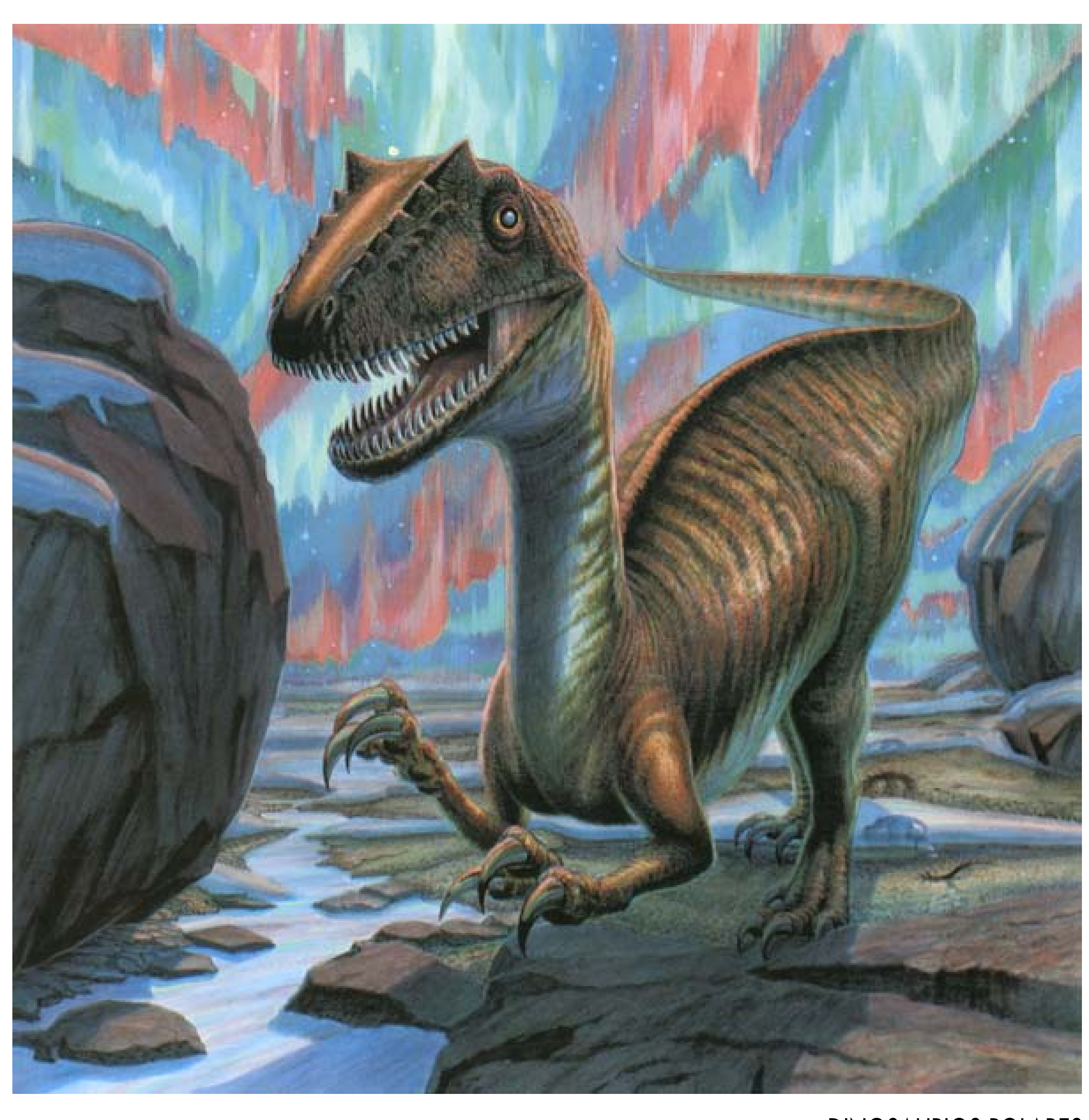
INVESTIGACION y CIENCIA

HUBBLE Y LA IDEA DE LA EXPANSION DEL UNIVERSO

LA NEBULOSA DEL SIDA

¿QUE ES LA LOGICA BORROSA?

Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN



DINOSAURIOS POLARES

SEPTIEMBRE 1993
700 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa



Septiembre de 1993 Número 204



SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Mónica Murphy: *Edwin Hubble y el universo en expansión*; Santiago Torres: *Cuasiespecies víricas*; Joaquín Moratalla: *Dinosaurios polares de Australia*; M. Puigcerver: *La medición exacta del tiempo*; Esteban Santiago: *Cirugía de las arritmias cardiacas*; José Pagés Martínez: *Lógica borrosa*; Andrés Sánchez Pascual: *Un antiguo asentamiento en Licia*; J. Vilardell: *Hace...*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; J. M. García de la Mora: *Ensayo*; Shigeko Suzuki: *De cerca*; Luis Bou: *Juegos matemáticos*

Ciencia y sociedad:

C. Cavada y F. Reinoso, Ramón Pascual, Juan P. Adrados, Santiago Torres

Ciencia y empresa:

José M.ª Terricabras

Libros:

Luis Alonso, Luis Cabrera, Antonio Prevosti y A. Domínguez Ortiz

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Portada: Dimitry Schidlovsky

Página	Fuente
9	J. R. Eyerman; LIFE *Magazine*, © Time Inc.; cortesía de la Biblioteca Henry E . Huntington
10	Biblioteca Henry E. Huntington (*arriba*), John R. Hale (*abajo, derecha*), Biblioteca Henry E. Huntington (*abajo, izquierda*)
11-12	Patricia J. Wynne
13	Observatorios Monte Wilson y Palomar
15-20	Jared Shneidman/JSD
21	Jean-Pierre Prével/Sygma
24-25	Peter Trusler
26	Johnny Johnson (*izquierda*), Frank Coffa (*derecha*)
27	Patricia J. Wynne (*arriba*), Steve Morton, Universidad de Monash (*abajo*)
28	Peter Trusler; cortesía de *Wildlife in Gondwana*, © Reed Books International
29	Peter Menzel; cortesía de National Geographic Society (*izquierda*), Frank Coffa (*derecha*)
44-45	Boris Starosta (*arriba*), Instituto Nacional de Normalizaciones y Tecnología (NIST) (*abajo*)
46	Boris Starosta
47	Boris Starosta (*izquierda*), NIST (*derecha*)
48-49	Boris Starosta
51	Johnny Johnson
52-54	Roberto Osti
56-57	Laurie Grace (*arriba*), Roberto Osti (*abajo*)
58	Laurie Grace
61	Michael Crawford
62-65	Ian Worpole
67	Proyecto Licia de Tubinga
68	Proyecto Licia de Tubinga (*arriba*), Spektrum der Wissenschaft (*abajo*)
69	Proyecto Licia de Tubinga (*arriba*), B. Kupke/ Spektrum der Wissenschaft (*abajo*)
70-71	Proyecto Licia de Tubinga/ Spektrum der Wissenschaft
72-75	Proyecto Licia de Tubinga
77-78	M. J. Martínez Valdivia
79	Cortesía de Conly Rieder, Centro Wadsworth, Albany
80	Cotesía de Bill Brinkley, Colegio Médico Bayler, Houston
87-89	Michael Goodman



La PORTADA muestra a *Allosaurus* cazando en las luces meridionales del sureste de Australia hace más de 100 millones de años, cuando la región se encontraba dentro del Círculo Antártico. Este espécimen, uno de los alosaurios más pequeños, constituye el último superviviente de los dinosaurios. Resistió tanto gracias a su perfecta adaptación al frío y la oscuridad —los factores que se pensaba habían llevado a los dinosaurios a la extinción hace unos 65 millones de años (véase "Dinosaurios polares de Australia", por Patricia Vickers-Rich y Thomas Hewitt Rich, en este número).

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
Juan Pedro Campos
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
M.ª Cruz Iglesias Capón
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Alan Hall, *Executive Editor*; Michelle Press, *Managing Editor*; John Rennie, Russell Ruthen, *Associate Editors*; Timothy M. Beardsley; W. Wayt Gibbs; John Horgan; Marguerite Holloway; *Senior Writer*; Philip Morrison, *Book Editor*; Corey S. Powell; Philip E. Ross; Ricki L. Rusting; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam.
PRESIDENT AND CHIEFEXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
CHAIRMAN OF THE BOARD Dr. Pierre Gerckens
CHAIRMANEMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	7.700	14.000
Extranjero	8.400	15.400

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 700 pesetas
Extraordinario: 900 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD
Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 - 76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Avda. Carrilet, 237 - 08907 l'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

... cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «El calentamiento por medio de ondas de alta frecuencia parte en realidad del día en que unos ingenieros que trabajaban con transmisores de onda corta contrajeron unas fiebres artificiales. Este tipo de fuente tiene las siguientes virtudes: el calor se genera directamente en el mismo objeto sin que medie transmisión alguna; no tiene por qué calentarse el resto del utillaje; no resulta afectada la superficie del material; los operarios trabajan a una temperatura más baja; no intervienen gases y, por ello, desaparece la posibilidad de corrosión; el material puede calentarse desde dentro hacia afuera; y, por último, es aplicable a objetos de forma o tamaño desusados.»

«Una nueva sustancia antibacteriana, la penicilina, ha ingresado en la categoría de los 'fármacos milagrosos'. Las pruebas clínicas realizadas con este medicamento permiten creer que supera a cualquier sulfamida en el tratamiento de las infecciones por *Staphylococcus aureus*. Los ensayos preliminares efectuados con heridas e infecciones de soldados que vuelven del frente han sido tan alentadores que continuarán a gran escala. Es un trabajo que presenta muchas dificultades, debidas sobre todo a que el moho del que se obtiene la penicilina (*Penicillium notatum*) produce sólo minúsculas cantidades de sustancias antibacterianas, y ello tras un período de cultivo en un caldo que debe ser cuidadosamente protegido y controlado. Según un informe reciente, un rendimiento de tan sólo un gramo de penicilina purificada por cada 20 litros de caldo de cultivo sería un excelente resultado.»

«No sería de extrañar que un futuro servicio de transporte aéreo muy rápido de pasajeros enlazase sin escalas Nueva York con Londres o París. Pero por lo que se refiere a servicios de pasaje que no sean de lujo y al transporte de mercancías o correo urgente, tan largos vuelos implicarían dificultades. No es la menor que tendrían que llevarse enormes cantidades de combustible. A fin de salvar este inconveniente esencial de la aviación se ha planteado de nuevo el anclar islas artificiales en el Atlántico Norte donde se pudiese repostar. Ideado ya en 1915 por Edward R. Amstrong, el Marédromo Amstrong es una isla de acero que consta de una plataforma flotante a más de 20 metros sobre el mar, con elementos flotadores que descienden hasta dar un calado de 48 a 55 metros. Para volar de Washington a Cherburgo por la ruta de los Marédromos habría que recorrer sólo 3.200 millas en cuatro etapas de 800 millas cada una.»

... cien años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Los hombres de ciencia están de acuerdo en que la raza humana surgió de un modo u otro de algún tipo de animal inferior, que no tiene por qué ser necesariamente un mono. La transición puede que no haya sido gradual, sino que, más bien, haya tenido lugar de forma abrupta (que la evolución haya procedido a saltos). No encontramos el "eslabón perdido"; sigue perdido y puede que lo esté para siempre. Hay opiniones diversas acerca de cuántos hombres primitivos hubo. Es posible que existieran varios centros diferentes, pero la ciencia y también la ortodoxia apuntan a la conclusión de que todos los hombres procedemos de una pareja primigenia que vivía en un lugar concreto. ¿Cuándo aparecieron esos hombres primitivos? La cuestión no está clara. Se nos explicaba antes que de ello hacía unos 6.000 años; pero hoy sabemos que por esa época vivían millares de hombres en Europa, Asia, Africa y América.»

«No hay razón para que un microscopista, especialmente si es naturalista, no pueda emplear el telescopio en sus investigaciones. La observación de la actividad de los insectos y otros animales diminutos es una ocupación interesante que puede efectuarse con ayuda de un telescopio pequeño, con tal de que tenga un objetivo lo bastante perfecto para que con él se puedan emplear oculares potentes. No sería incorrecto llamar a un instrumento como éste microscopio de largo alcance. En la platina se ha fijado un objetivo de precisión (de unos 20 centímetros de foco) procedente de un teodolito. El enfoque se logra mediante el cabezal moleteado del microscopio.»

Edwin Hubble y el universo en expansión

Lo que la teoría heliocéntrica vino a significar para la astronomía del Renacimiento, eso mismo ha supuesto para la cosmología moderna la idea de Hubble de un universo en expansión ocupado por multitud de galaxias

Donald E. Osterbrock, Joel A. Gwinn y Ronald S. Brashear

A lo largo de los años veinte y treinta de nuestro siglo, Edwin Powell Hubble modificó el conocimiento científico del universo como nadie lo hiciera desde los tiempos de Galileo. En la línea del pisano, que desalojó la Tierra del centro del sistema solar, Hubble demostró que la Vía Láctea no era única, sino una más entre millones y millones de galaxias o "universos isla". Su trabajo facilitaría la sustitución de una concepción del cosmos estática por la teoría, asombrosa, de un universo en expansión, la prolongación hasta su extremo de la afirmación desafiante, si bien apócrifa, de Galileo, "Pero se mueve". Aunque fueron muchos los investigadores que contribuyeron a esos descubrimientos revolucionarios, el apasionado instinto de Hubble, su fina inteligencia y sus grandes dotes de comunicación le permitieron asir el problema de la construcción del universo y convertirlo en algo personal.

Se han mitificado los primeros años de la vida de Hubble. Glorificación debida, en parte, a su propio afán por encarnar la figura del héroe y, en parte, a la imagen romántica que se perfila en los diarios de su esposa Grace. Hay que andar, pues, con cautela a la hora de aceptar ciertos esbozos biográficos; por ejemplo, se lee a menudo que era un boxeador de calibre profesional, cuando no existe dato alguno que lo corrobore. Ni parecen tener base alguna las supuestas heridas recibidas durante su enrolamiento en la Primera Guerra Mundial.

La verdad es que la vida de Hubble no necesita de esos adornos para ejemplificar una historia de éxito típicamente americana. La familia Hubble se estableció en Missouri en 1833, cuando el bisabuelo de Edwin cabalgó desde Virginia para instalarse en el actual condado de Boone. El abuelo de Edwin y su padre, John P. Hubble, eran agentes de seguros, muy trabajadores y moderadamente prósperos. Su madre, Virginia Lee James Hubble, era la novena descendiente directa de Miles Standish. Con la exuberancia desmesurada que la caracterizaba, Grace Hubble describió así a los antepasados de su marido: "Altos, bien formados, fuertes... Edwin heredó este legado corporal hasta en su cutis limpio y suave, que se bronceaba al sol, y su cabello castaño con reflejos de oro cobrizo. También le dejaron sus tradiciones: la integridad, el patriotismo, la lealtad hacia sus familias... y una vigorosa fe en el esfuerzo propio."

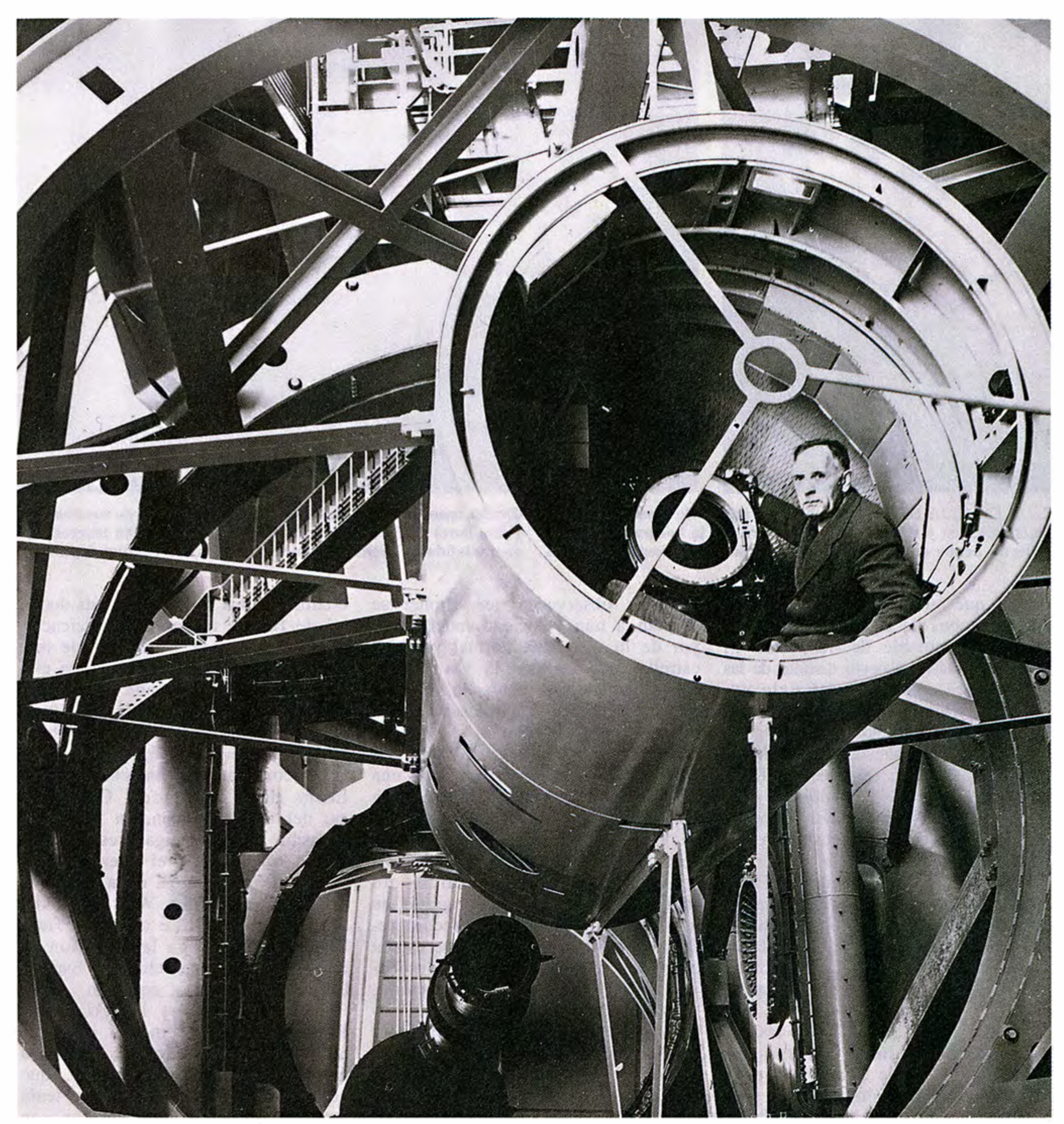
Edwin nació en Marshfield, Missouri, el 20 de noviembre de 1889. Tercero de siete hijos, todos los cuales sobrevivieron. En 1898, los Hubble se trasladaron a Evanston, Illinois, y dos años más tarde, a Wheaton, donde Edwin mostró una excelente aptitud para los estudios y el atletismo. Durante esos años, se convirtió en un atleta brillante en el instituto de Wheaton, especialmente con el equipo de pista; en el aula siempre estaba entre los primeros. A la edad de 16, ingresó en la Universidad de Chicago, donde siguió mostrando sus talentos paralelos: obtuvo cualificaciones altas en matemáticas, química, astronomía e idiomas y, pese a tener dos años menos que la mayoría de sus compañeros de clase, sobresalió en pista y baloncesto.

Después de graduarse, le concedieron una beca Rhodes. Ni siquiera entonces aparecía claro en qué dirección le llevarían sus polifacéticas habilidades. Cuando ingresó en el *Queens College* de la Universidad de Oxford, en octubre de 1910, se matriculó en derecho, cumpliendo el deseo de su padre y de su abuelo. En dos años se licenció, con honores. Dedicó un tercero al estudio de la lengua española, sin abandonar su participación en numerosas actividades deportivas.

Edwin siguió disfrutando de la beca tres años más. Regresó luego con su familia, que para entonces se había trasladado a Kentucky. Afirmaba haber superado la prueba de capacidad para ejercer la abogacía en el estado de Kentucky y abierto bufete en Louisville. Según cuenta su amigo Nicholas U. Mayall, dejó las leyes por la astronomía, a sabiendas de que, aun cuando no llegara a sobresalir, era lo que en definitiva le importaba. Pero no tenemos documentación que avale la superación de la mencionada prueba, ni su práctica del derecho. Más verosímil parece que, durante ese período, diera clases y fuera entrenador de baloncesto en el instituto de New Albany, Indiana, en la ribera opuesta del río Ohio.

Con un escaso interés por las leyes e insatisfecho con su profesión docente, Hubble decidió volver a su verdadera pasión: la astronomía. En la primavera de 1914, escribió a Forest Ray Moulton, su profesor de as-

DONALD E. OSTERBROCK, JOEL A. GWINN y RONALD S. BRASHEAR comparten el mismo interés por resaltar el lugar que ocupa Hubble en la historia de la astronomía. Osterbrock ha sido director del Observatorio de Lick en el monte Hamilton, donde divide su tiempo entre la investigación y la enseñanza. Gwinn lleva más de treinta años dando clases de física en la Universidad de Louisville. Brashear, que se formó en esta última, es encargado de historia de la ciencia en la Biblioteca Henry E. Huntington de San Marino, California.



1. HUBBLE se valió de su experiencia observacional, su empuje personal y su acceso a óptimas instalaciones para realizar descubrimientos fundamentales. Aquí lo vemos subido al foco primario del telescopio Hale de 5 metros, hacia 1950.

tronomía en Chicago, para preguntarle acerca de la posibilidad de regresar en calidad de alumno de doctorado. Moulton le recomendó sin reservas a Edwin B. Frost, que dirigía el Observatorio de Yerkes en Williams Bay, Wisconsin, donde se impartía el programa de doctorado.

Frost aceptó encantado al nuevo alumno y le procuró una beca para cubrir los gastos de docencia, manutención y alojamiento. La Sociedad Americana de Astronomía tenía previsto reunirse en agosto de 1914 en la Universidad Northwestern, en la localidad cercana de Evanston. Frost sugirió a Hubble que llegara a tiempo para asistir al encuentro. Así acudió a la reunión en la que Vesto M. Slipher, un astrónomo tranquilo y modesto del Observatorio de Lowell, provocó la controversia con sus últimos trabajos sobre las nebulosas.

El término "nebulosas" constituía una palabra comodín, utilizada durante siglos por los astrónomos para designar los objetos débiles, parecidos a las nubes, cuya posición y aspecto, a diferencia de los cometas, no registraban variación alguna. La naturaleza de estos objetos se resistía a cualquier explicación directa. En 1755, Immanuel Kant postuló que algunas nebulosas podrían ser los llamados "universos isla": sistemas independientes de estrellas, como nuestra Vía Láctea. Esta idea despertó la imaginación de los expertos, aunque no había forma disponible de corroborarla.

El refinamiento de la observación telescópica conseguido en el siglo XIX




2. LA FAMILIA DE HUBBLE ayudó a infundirle el sentimiento de automotivación y el amor al trabajo duro. En la fotografía de la izquierda acaba de licenciarse en la Universidad de Chicago. En la de la derecha, aparece en una salida campestre con algunos de sus alumnos y familiares de éstos. La biografía de Hubble ha sido innecesariamente tejida de hechos "heroicos" que los autores han depurado.

mostró que muchas nebulosas consistían en nubes de gas luminoso. Pero cierto tipo notable de nebulosas en espiral ofrecía un aspecto distinto de las demás. Para comienzos del siglo XX, muchos astrónomos llegaron a creer que las nebulosas espirales eran galaxias lejanas compuestas por multitud de estrellas. Los escépticos siguieron argumentando que estos objetos eran estructuras próximas, quizás estrellas jóvenes en proceso de gestación.

En la reunión de la Sociedad Americana de Astronomía en 1914, Slipher presentó las primeras fotografías, con una buena exposición y calibración, de los espectros de nebulosas espirales. Esas fotografías manifestaban la luz de las nebulosas después de haberse dividido en su arco iris de colores. Los espectros de las estrellas contienen líneas oscuras, denominadas líneas de absorción, causadas por la radiación que ha sido capturada por los átomos presentes en las atmósferas estelares. Slipher mostró que los espectros de las nebulosas espirales exhibían los tipos de espectros de líneas de absorción característicos de grupos de estrellas.

Slipher encontró también que las longitudes de onda de las líneas de absorción de las nebulosas estaban fuertemente desplazadas con respecto al punto donde aparecen en el laboratorio. Estas variaciones de longitud de onda, o corrimientos Doppler, tienen su origen en el movimiento del objeto emisor de luz hacia la Tierra o, en dirección opuesta, alejándose de nuestro planeta. Los corrimientos Doppler indicaban que las nebulosas espirales observadas por Slipher se movían a una velocidad mucho mayor de lo que sería normal para las estrellas que pueblan la Vía Láctea, consolidando, por tanto, la idea de que las nebulosas espirales no pertenecían a nuestra galaxia.

Cuando Hubble llegó al Observatorio de Yerkes, se encontró con una institución mortecina, dedicada a la investigación rutinaria. Sin amilanarse, emprendió su propia línea de trabajo. Inspirado, sin duda, por la presentación de Slipher, inició un sugestivo programa de fotografía de nebulosas mediante el telescopio reflector de 60 centímetros, que estaba prácticamente arrinconado. Ese trabajo se convirtió en su tesis doctoral, "Investigaciones fotográficas de nebulosas débiles", que presagiaba el tipo de investigación que habría de llevar a cabo más tarde sobre galaxias y cosmología.

Hubble describió y clasificó las nebulosas, pequeñas y débiles, que no guardaban semejanza con las nubes difusas de gas; la mayoría, advertía, eran elípticas, no espirales. Subrayó que la distribución de nebulosas débiles no se produce en las regiones celestes próximas a la Vía Láctea; muchas, además, aparecen agrupadas. No dejaba sombra de duda sobre la dirección en que apuntaba su razonamiento: "Imagina que sean extrasiderales y que lo que estamos viendo sean quizá cúmulos de galaxias; imagina que estén dentro de nuestro propio sistema, y su naturaleza se convierte en un misterio", escribió en una ocasión. La tesis doctoral de Hubble adolece de deficiencias técnicas y las ideas teóricas que maneja parecen algo confusas, pero claramente muestra la mano de un gran científico que avanza a tientas hacia la solución de un problema nuclear.

En octubre de 1916, Hubble mantuvo correspondencia con George Ellery Hale, director del Observatorio del monte Wilson, en Pasadena. Buscaba éste investigadores que pudieran trabajar con el telescopio reflector de 2,5 metros, cuya construcción en el monte Wilson estaba llegando a su fin. Le ofreció a Hubble un contrato, con la condición de que terminase su doctorado. Esperaba defender la tesis en junio.

La entrada de los EE.UU. en la Primera Guerra Mundial, el 6 de abril de 1917, obligó a Hubble a abandonar sus planes. Hubble, que como antiguo becario Rhodes tenía profundas ataduras emocionales con Gran Bretaña, pensó que sus obligaciones patrióticas debían primar sobre su carrera científica. Se alistó el 15 de mayo, sólo tres días después de recibir su doctorado, comenzando un curso de formación para oficiales.

Se encontró a sus anchas en la milicia. Alcanzó el empleo de comandante de batallón y después ascendió a mayor de la División 86 "Halcón Negro". En septiembre de 1918 la división partió para Europa. Pero se firmó el armisticio antes de que se le presentara la ocasión de entrar en combate. Dio por cerrado ese capítulo de su vida y se dispuso a abrir la página siguiente.

Tras licenciarse, el 20 de agosto de 1919, se dirigió inmediatamente al monte Wilson. Su llegada se produjo en un momento inmejorable: el observatorio contaba con dos grandes telescopios reflectores, uno de 1,5 metros y otro nuevo de 2,5 metros, entonces el mayor del mundo. Los estudios realizados por Hubble en Yerkes le enseñaron a sacarle a los telescopios el máximo partido. La tesis le había marcado el rumbo de la investigación a seguir.

Milton L. Humason, quien más tarde habría de colaborar con Hubble en sus estudios del universo lejano, recordaba la primera vez que Hubble observó en el monte Wilson: "La calidad atmosférica de esa noche fue calificada de pésima según nuestra escala, pero cuando él terminó de revelar sus placas estaba lleno de júbilo. 'Si esto es un ejemplo de mala calidad atmosférica', dijo, 'siempre podré obtener buenas fotografías con los instrumentos del monte Wilson'. La seguridad y el entusiasmo que mostró esa noche reflejaban su talante ante los problemas. Tenía mucha confianza en sí mismo —estaba seguro de lo que quería hacer y de cómo hacerlo."

Hubble volvió pronto a retomar la cuestión de la naturaleza de las "nebulosas no-galácticas", aquellas "cuyos miembros integrantes tienden a evitar el plano galáctico, concentrándose en altas latitudes galácticas". Por aquel entonces, no había aceptado del todo la idea de que se tratara de galaxias situadas allende la nuestra. Comenzó un estudio detallado de nebulosas no-galácticas centrándose en el objeto irregular NGC 6822 ("NGC" es una abreviatura del Nuevo Catálogo General de nebulosas *—New General Catalogue—* de J. L. E. Dreyer). Con el telescopio de 2,5 metros, había encontrado ya en 1923 varias nebulosas pequeñas y doce estrellas variables en el interior de NGC 6822.

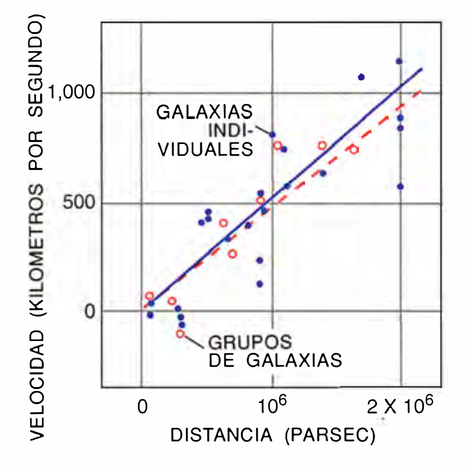
En 1924, contrajo matrimonio con Grace Burke Leib, una viuda cuyo primer marido había fallecido en 1921 como consecuencia de un accidente sufrido en una mina de carbón. Grace conoció a Edwin durante una visita al monte Wilson en 1920; tan impresionada quedó, que lo idealizó para el resto de su vida. Se le presentó como un dios del Olimpo, escribirá años más tarde, "alto, fuerte y hermoso, con los hombros del Hermes de Praxíteles, y un semblante sereno y bondadoso". Pasaron la luna de miel en Carmel y en Europa.

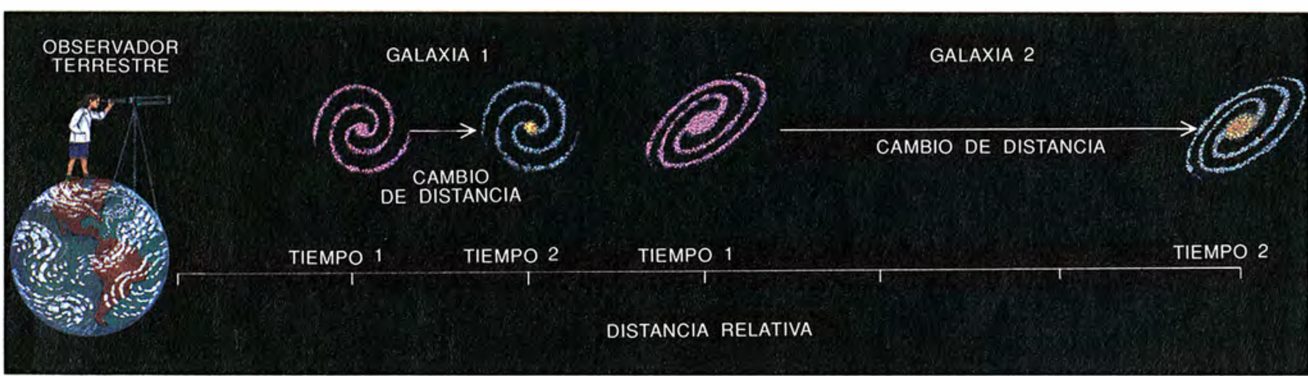
Hubble regresó a Pasadena. Dirigió su atención hacia M31, la famosa galaxia de Andrómeda. Valiéndose de su gran destreza observacional y las prestaciones inigualadas del telescopio gigante de 2,5 metros, captó seis estrellas variables en M31. Para Hubble, ese dato confirmaba sin equívocos que M31 era un sistema lejano compuesto de estrellas y, por ende, que otras nebulosas espirales débiles eran galaxias incluso más distantes.

Aunque la estrella más brillante que pudo detectar era sólo de magnitud 18 en su máximo —60.000 veces más tenue que las estrellas más débiles que el hombre es capaz de percibir a simple vista—, logró tomar 83 mediciones de su luminosidad, una proeza impresionante en aquellos tiempos. A partir de esos datos, determinó que el brillo de la estrella ascendía y descendía a la manera de las variables Cefeidas, estrellas que revestían un enorme interés porque el período de variación de una Cefeida se relaciona directamente con la luminosidad absoluta de la estrella. Por medio de la comparación de esa luminosidad con sus observaciones del brillo aparente de la estrella, Hubble dedujo la distancia existente hasta la estrella y su galaxia circundante.

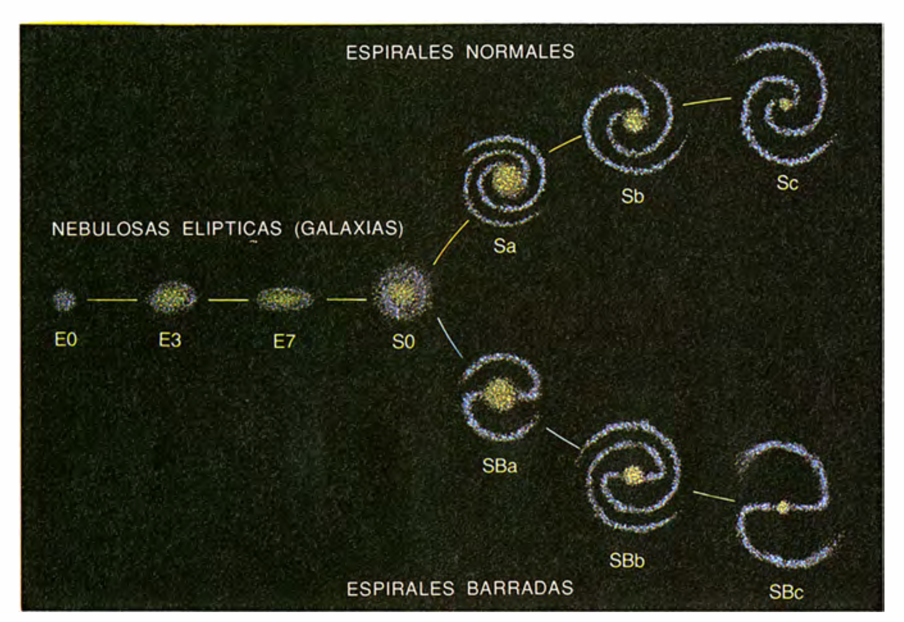
En un endemoniado alarde de energía, sus descubrimientos se sucedían a un ritmo vertiginoso. A finales de 1924 ya había identificado otras Cefeidas variables en M31 y M33, una galaxia espiral situada en la constelación del Triángulo. Envió un artículo que describía sus resultados a la reunión conjunta que celebraban, en Washington D.C., la Sociedad Astronómica Americana y la Sociedad Americana para el Progreso de la Ciencia; allí lo leyó en su nombre el astrofísico Henry Norris Russell, el primero de enero de 1925. Hubble había deducido que tanto M31 como M33 se hallan a 930.000 años luz de distancia, mucho más allá de los límites de la Vía Láctea. En palabras de Joel Stebbins, secretario de la Sociedad Astronómica, Hubble "había logrado, por fin, confirmar la teoría de los universos isla".

El raudo progreso de su investiga-





3. LA LEY DE HUBBLE postula que las galaxias se alejan a una velocidad directamente proporcional a su distancia del observador. Un gráfico de la distancia en función de la velocidad (*arriba*), que publicó en 1929, muestra la relación lineal que se produce en virtud de la expansión uniforme del universo en todas las direcciones. La ilustración inferior esquematiza el fenómeno. La distancia a que se halla la galaxia 2 triplica la lejanía a que se encuentra la galaxia 1, por lo que se ha desplazado cubriendo tres veces más recorrido durante el tiempo transcurrido entre el tiempo 1 y el tiempo 2. Los observadores terrestres, por consiguiente, ven a la galaxia 2 alejándose tres veces más deprisa que la galaxia 1.



4. ESQUEMA DE CLASIFICACION DE GALAXIAS, elaborado por Hubble en los años veinte. Fundábase en que las galaxias elípticas desarrollan brazos y se convierten en galaxias espirales normales o barradas. Los astrónomos han rechazado la teoría evolucionaria de Hubble, pero siguen aprovechando su diagrama.

ción contrasta con la lentitud con que daba a la imprenta sus resultados. Quería andar sobre seguro. Su primer artículo con resultados concernientes a las estrellas variables de las nebulosas espirales apareció avanzado ya 1925. Apoyado en las observaciones de las Cefeidas de NGC 6822, declaró que se trataba del "primer objeto que quedaba asignado definitivamente a una región exterior al sistema galáctico". *Una Nebulosa Espiral como Sistema Estelar*, piedra miliar en la historia de la ciencia, apareció en 1926; en ese artículo presentaba pruebas de que M33 es también una galaxia que se encuentra mucho más allá de la nuestra. No culminó esta fase de la investigación hasta 1929, año en que publicó otro artículo muy amplio, donde resumía con todo lujo de detalles sus estudios sobre la distancia y la composición estelar de M31.

Además de determinar la distancia hasta las "nebulosas extragalácticas", se aprestó a clasificarlas y desentrañar la diversidad de sus estructuras. En 1923 comenzó a ordenar las nebulosas según su patrón de evolución. Conforme una nebulosa elíptica envejece, razonaba, va formando unos brazos que se extienden y despliegan. Para explicar la existencia de espirales barradas, en las que los brazos espirales parten de una formación de tipo barra y se extienden a modo de estela, Hubble sugirió que la elíptica podría evolucionar hasta convertirse en una espiral normal o en una barrada. El consiguiente diagrama de clasificación de dos puntas se sigue empleando, aunque despojado de sus implicaciones evolutivas.

De todas sus contribuciones al saber, la principal fue, sin la menor duda, la investigación que le condujo a la demostración de que vivimos en un universo en expansión. Los indicios que apuntaban a la veracidad de este fenómeno habían empezado a emerger mucho antes de que Hubble abordara el problema. Desde 1910, Slipher había notado que la mayoría de las galaxias que solía observar parecían alejarse del Sol. En 1924 un trío de astrónomos —el alemán Carl W. Wirtz, el sueco Knut E. Lundmark y el americano Ludwik W. Silberstein— había reunido pruebas de que las nebulosas espirales, sobre todo las menores y más remotas, se alejan de la Vía Láctea a una velocidad superior a las que se encuentran más cerca de la Tierra. Los datos aportados eran, sin embargo, marginales, lo que sumado al estilo polémico de Silberstein, teñido de estrafalarias afirmaciones, frenó la aceptación de la idea de un universo en expansión.

Para avanzar se necesitaba un telescopio mayor; y el telescopio de 2,5 metros del monte Wilson era el ideal. Mediada la década de los veinte, Hubble se hallaba empeñado en medir el brillo de las estrellas que poblaban las galaxias espirales; solicitó a Humason que determinara las velocidades radiales de las galaxias, es decir, si se movían hacia el observador o si, por el contrario, se alejaban del mismo. Humason calculó los movimientos midiendo los desplazamientos de las líneas de emisión y absorción en los espectros de las galaxias. Cuando un objeto se aleja, su luz se desplaza hacia la parte roja del espectro, dando lugar a un movimiento de corrimiento hacia el rojo.

En su búsqueda de señales de que el cosmos se expande, Hubble necesitaba conocer no sólo las velocidades a las que se mueven las galaxias, sino también cuán distantes son esas galaxias; le facilitó muchísimo su labor el haberse familiarizado ya con las medidas de distancias cósmicas. Derivó la magnitud media absoluta de las estrellas más brillantes, y de la galaxia en su totalidad, para cada una de las pocas galaxias cuyas distancias había podido determinar mediante la observación de las Cefeidas. Y extrapoló luego esos resultados para establecer las distancias hasta galaxias situadas más allá de M31 y M33.

El primer artículo de Hubble que versó sobre la relación velocidad-distancia, publicado en 1929, provocó un auténtico terremoto en la comunidad astronómica. Sus descubrimientos se convirtieron en parte de los cimientos de la teoría de la gran explosión ("big bang"), apuntalando la cosmología moderna. Subrayaba allí que, a diferencia de otros que le precedieron, sólo había utilizado "las distancias nebulares [galácticas] que a todas luces parecen fiables". El artículo combinaba sus estimaciones de distancias con las mediciones precisas de velocidades radiales recogidas por Slipher, Humason y otros.

A partir de esos datos, Hubble derivó una relación lineal entre velocidad y distancia, que en su expresión moderna se formula: $v = H_0 d$. En su honor, se llama ley de Hubble la afirmación suya de que las velocidades de recesión de las galaxias lejanas son proporcionales a sus distancias; por él también, la constante H_0 denomínase constante de Hubble. La ley de Hubble implica que el universo está en expansión; es decir, las velocidades aumentan a medida que miramos cada vez más allá desde cualquier punto del universo.

Entre 1931 y 1936 Hubble y Humason aplicaron la ley del corrimiento hacia el rojo a distancias cada vez mayores. Hubble se percató en seguida de que sus hallazgos apoyaban la hipótesis de un universo en expansión, aunque nunca acabó de creer que los desplazamientos hacia el rojo se produjeran en virtud de los movimientos radiales de las galaxias. Sostuvo siempre que los movimientos deducidos a partir de los corrimientos eran "velocidades aparentes".

Obtuvo un valor para H_0 —entedida hoy como velocidad de expansión del universo— cifrado en 500 kilómetros por segundo y por megaparsec (un megaparsec representa tres millones de años luz). Mas, desde la perspectiva actual, ese valor de la constante resulta excesivo. Los astrónomos hablan ahora de valores entre 50 y 100 kilómetros por segundo y por megaparsec. El error de Hubble obedecía a que subestimó la magnitud absoluta de las estrellas más brillantes de las galaxias que observó. Pese a lo cual, realizó un espléndido esfuerzo de partida.

Tras sus investigaciones sobre la ley del corrimiento hacia el rojo, concentró sus esfuerzos en la cosmología observacional. Se propuso, en particular, medir la variación de la densidad aparente de galaxias muy lejanas en función de la distancia, para así determinar la geometría global del universo. Colaboró con Richard C. Tolman y Howard P. Robertson, del Instituto de Tecnología de California, quienes se hallaban en la vanguardia de la investigación sobre modelos teóricos de la curvatura del espacio. No le acompañó aquí el mismo éxito, por culpa de la dificultad que entraña medir el brillo de galaxias lejanas muy tenues.

Aunque sus trabajos posteriores no lograron igualar los descubrimientos realizados durante los años veinte y principios de los treinta, siguió ejerciendo una poderosa influencia sobre la dirección que tomaba la investigación astronómica y se esforzó en acercar esa ciencia al público. Sus libros *The Realm of the Nebulae* y *The Observational Approach to Cosmology* inspiraron a toda una generación de jóvenes astrónomos y físicos. Nadie que haya leído los libros de Hubble o escuchado sus conferencias podría ignorarle. Por otro lado, su irresistible personalidad despertaba la misma atracción popular que la de las estrellas de cine y escritores que, en la madurez de su vida, se convertirían en sus amigos. Iba siempre atildado y hablaba con un dejo de distinción británica.

En un esfuerzo por impulsar los límites de la cosmología observacional, colaboró en la construcción del telescopio Hale de 5 metros en el monte Palomar, que hubo de retrasarse al estallar la guerra. Tras el ataque japonés a Pearl Harbor, se incorporó al Laboratorio de Investigación Balística del ejército en Aberdeen, para trabajar en los cálculos de las trayectorias de los proyectiles de artillería. El telescopio de 5 metros entró en funcionamiento en 1948. Hubble continuó su investigación en monte Palomar hasta que un accidente cerebrovascular acabó con su vida. Fue el 28 de septiembre de 1953. Tenía 63 años.



5. GALAXIA ESPIRAL M33, uno de los objetos que primero centraron el empeño de Hubble por determinar la escala de distancias del universo. Apoyándose en sus observaciones de las estrellas Cefeidas variables situadas en M33, demostró que ésta se encuentra mucho más allá de los límites conocidos de la Vía Láctea y, por consiguiente, que se trata de una galaxia independiente parecida a la nuestra.

Humason y posteriormente Rudolph L. Minkowski tomaron su relevo en el telescopio de 5 metros para detectar galaxias aún más lejanas y con mayores velocidades de recesión. Walter Baade volvió a calibrar la relación período-luminosidad para las estrellas Cefeidas variables y descubrió que todas las distancias galácticas de Hubble, aunque parecieran enormes, había que multiplicarlas por un factor dos. Su antiguo alumno Allan Sandage y muchísimos más seguirían refinando el valor de la constante de Hubble. El triunfal trabajo de los sucesores de Hubble representa un elocuente homenaje al pensamiento innovador y a la energía sin límites que le permitió imprimir una nueva dirección al curso de la cosmología moderna.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MAN DISCOVER'S THE GALAXIES. Richard Berendzen, Richard Hart y Daniel Seeley. Columbia University Press, 1984.

THE OBSERVATIONAL APPROACH TO COSMOLOGY: U. S. OBSERVATORIES PRE-WORLD WAR II. Donald Osterbrock en *Modern Cosmology in Restrospect.* Dirigido por R. Bertotti, R. Balbinot, S. Bergia y A. Messina. Cambridge University Press, 1990.

SELF-MADE COSMOLOGIST: THE EDUCATION OF EDWIN HUBBLE. Donald E. Osterbrock, Ronald S. Brashear y Joel A. Gwinn en *Evolution of the Universe of Galaxies: Edwin Hubble Centennial Symposium.* Dirigido por Richard G. Kron, Astronomical Society of the Pacific, 1990.

Cuasiespecies víricas

La definición común de especie biológica no es aplicable a los virus. Una visión más amplia y dinámica de las poblaciones permite entenderlos y combatirlos mejor

Manfred Eigen

Cuenta la mitología griega que, cuando la curiosa Pandora abrió una caja prohibida, todos los males y miserias se esparcieron por el mundo. Entre esas calamidades se contaban, sin duda, los virus, vocablo que en latín significa cieno, veneno y hedor. Los virus causan muchas enfermedades, desde el resfriado común hasta el sida, o síndrome de inmunodeficiencia adquirida, quizás el azote más terrible de los tiempos modernos.

Los virus tienen la habilidad de confundir por igual a expertos y profanos. Un rasgo que más ha llamado la atención ha sido siempre el de su elevada mutación; tanto, que cabría admitir que la evolución de los virus es un millón de veces más rápida que la de los microorganismos celulares. Pero si eso fuera verdad, ¿cómo podrían haber mantenido su identidad como especies patógenas en el curso del tiempo? ¿Por qué no han mutado hasta desaparecer?

Las cuestiones de este tenor no suelen hallar respuesta en el marco teórico en que se mueve la biología. Sin embargo, tomando prestadas ideas de matemáticos y químicos, mis colegas y yo hemos introducido un concepto, el de cuasiespecie, capaz de aportar nuevas perspectivas a dichos problemas. Según hemos demostrado, una especie vírica es una población compleja de entidades afines, que actúan como un todo y se autoperpetúan.

MANFRED EIGEN es director de investigación en cinética bioquímica del Instituto Max-Planck de Química Biofísica de Göttingen, donde empezó su formación en 1951. Por sus trabajos en el desarrollo de técnicas de medición de reacciones de alta velocidad, compartió el premio Nobel de química en 1967. Su campo de interés se centra ahora en el estudio de la evolución molecular y sus aplicaciones técnicas.

La sustitución de especie por "cuasiespecie" no es mero trueque semántico. Afecta al propio comportamiento de los virus. En el caso del virus del sida, por ejemplo, puede ser útil a la hora de determinar cuándo empezó a evolucionar el virus de inmunodeficiencia humana (VIH) y de dónde procede. Si se extrapola sólo a partir de datos epidemiológicos, se dirá que el sida apareció en 1979. Mas, de acuerdo con nuestros datos, el VIH sería un virus antiquísimo. Además, la noción de cuasiespecie ilustra sobre posibles tratamientos del sida y otras enfermedades que hasta el momento se han resistido a las vacunas.

Antes de hablar de cuasiespecies, importa saber qué es un virus. André Lwoff, premio Nobel, ofrecía en 1959 la siguiente respuesta: "¡un virus es un virus!" Truismos aparte, pone de manifiesto la unicidad de los virus dentro del mundo vivo. A grandes rasgos, el virus es un programa genético que lleva un mensaje muy simple de una célula a otra: "¡reprodúceme!" De todos los mensajeros que se disputan la atención de la célula hospedadora, los que corresponden al virus son muy pocos. Por ello, debe emplear ciertos trucos bioquímicos para conseguir que la maquinaria de replicación del hospedador se ponga al servicio de sus egoístas propósitos. Lo que supone, con frecuencia, la muerte del hospedador.

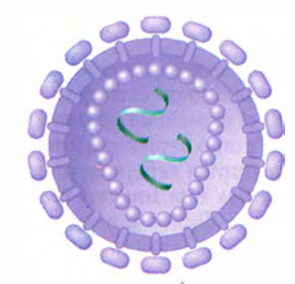
Hay muchas clases de virus. Pero podemos agruparlos por el tipo de material genético que portan. Quizá la forma más simple sea la representada por una molécula de ácido ribonucleico (ARN) unicatenario compuesto por varios miles de subunidades nucleotídicas. Este ARN, o cadena "más", puede ser leído directamente por el aparato de traducción del hospedador, el ribosoma, como si fuese un ARN mensajero propio. Ejemplos de virus con cadenas "más" son el bacteriófago Qβ, parásito de la bacteria *Escherichia coli*, y el virus polio-1, agente de la parálisis espinomuscular. Otros virus cifran sus mensajes en cadenas de ARN "menos"; una vez en el interior celular, las cadenas "menos" han de transcribirse en cadenas complementarias de tipo "más" para que empiece la replicación. La gripe de tipo A, una de las enfermedades más comunes, es causada por un virus de cadena "menos".

Los retrovirus constituyen una tercera clase de virus de ARN unicatenario. Cuando un retrovirus infecta a una célula, la enzima retrotranscriptasa transforma la cadena de ARN vírico en ácido desoxirribonucleico (ADN) bicatenario. Este ADN puede integrarse en el genoma del hospedador, convirtiendo así el mensaje del virus en una característica heredable de la célula. El VIH pertenece a la familia de los retrovirus. Ataca el sistema inmunitario, que es el encargado de ofrecer protección contra los virus.

Por depender tan estrechamente del sistema replicativo de sus hospedadores, suele afirmarse que las formas actuales de los virus hunden sus orígenes en una vida celular. Cabe incluso que desciendan de fragmentos de los programas genéticos de sus hospedadores y hayan aprovechado su conocimiento de la célula para duplicarse. Sea como fuere, los virus revisten especial interés para estudiar el mecanismo a través del cual, en el amanecer de la vida, las moléculas lograron organizarse en unidades capaces de autoperpetuación. Nos revelan cómo puede generarse y procesarse la información molecular. La esencia de su información genética yace en la autoconservación, que consiguen a través de la mutación, reproducción, proliferación y adaptación a un medio en continuo cambio.

El genoma de un virus de ARN



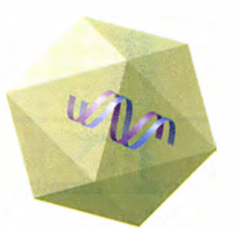




VIRUS DE ARN
DE CADENA "MENOS"

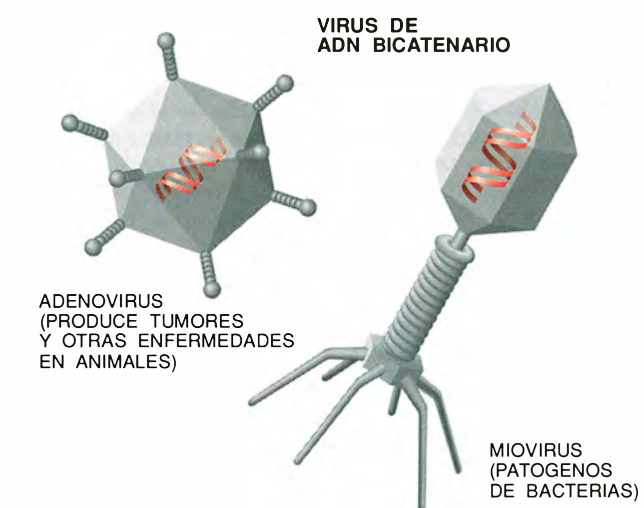
ORTOMYXOVIRUS
(PRODUCEN GRIPE
Y OTRAS ENFERMEDADES
EN ANIMALES)





CELULA
HOSPEDADORA

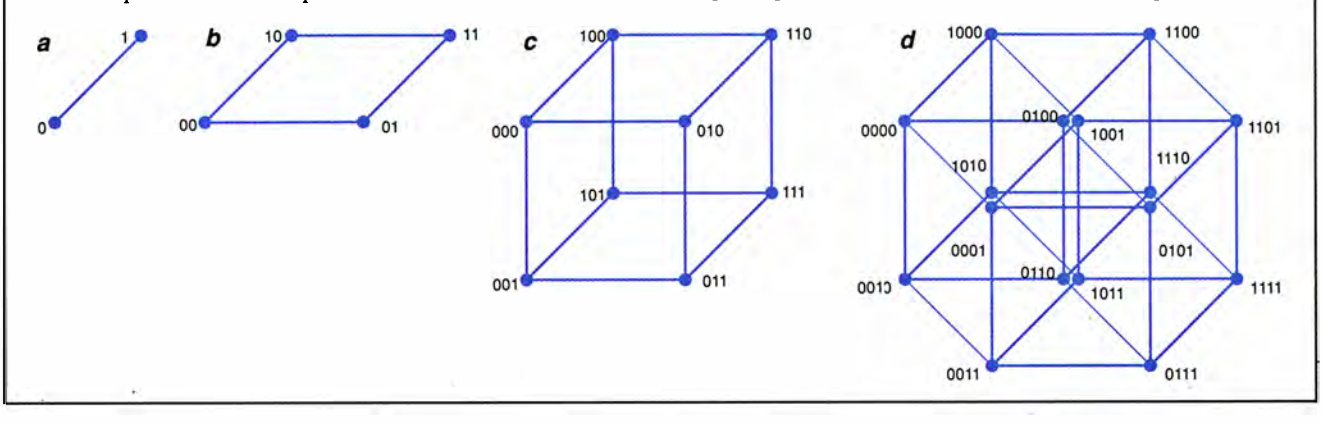




1. LOS VIRUS PERTENECEN a familias muy diversas, que podríamos distinguir por el tipo y actividades de sus moléculas genéticas. En algunos virus, los genes están en moléculas de ADN unicatenarias o bicatenarias; en otros, los genes son moléculas de ARN. Algunos virus portan cadenas "más" que se traducen directamente por la maquinaria de síntesis de proteínas de la célula hospedadora. En los virus de cadenas "menos", el ARN debe transcribirse primero en cadenas complementarias de tipo "más". Los retrovirus, como los que causan el sida, requieren que su ARN se retrotranscriba en ADN bicatenario. En la figura sólo se indican algunas de las múltiples formas de virus.

Así se construye un espacio de secuencias

Para estudiar las secuencias nucleotídicas de los genes de los virus podemos cartografiarlas en una matriz multidimensional: el espacio de secuencias de Hamming. En ese espacio, cada punto representa una secuencia única; la separación entre puntos refleja la magnitud de sus diferencias. Nos haremos una imagen mejor si consideramos secuencias cortas de dígitos binarios. Para una secuencia con una sola posición, existen dos posibles secuencias, que pueden representarse como los puntos extremos de una línea (*a*). Para una secuencia con dos posiciones, hay cuatro permutaciones, que forman los vértices de un cuadrado (*b*). Las variaciones en una secuencia de tres dígitos son las esquinas de un cubo (*c*), y las de una secuencia de cuatro dígitos, los vértices de un hipercubo tetradimensional (*d*). Los espacios con niveles dimensionales superiores se construyen de forma repetitiva, dibujando el diagrama anterior dos veces y conectando los puntos correspondientes. La complejidad de los espacios de secuencias de los genomas víricos supera, de lejos, la sencillez de estas figuras, ya que hay que considerar miles de posiciones, cada una de las cuales puede estar ocupada por uno de los cuatro nucleótidos posibles.



unicatenario, como el VIH, que contiene sólo 10.000 nucleótidos, es pequeño y sencillo, comparado con el de la mayoría de las células. Sin embargo, desde una perspectiva molecular, encierra una extraordinaria complejidad. Cada nucleótido consta de una de estas cuatro bases: adenina, uracilo, guanina o citosina. La secuencia del genoma del VIH es, por tanto, una de las $4^{10.000}$ posibilidades que pueden darse, un número que equivale a la unidad seguida por 6000 ceros.

La mayoría de las secuencias no podrían ser clasificadas como virus, dada su incapacidad de dirigir la propia duplicación. No obstante, aunque sólo una pequeña fracción de ellas pueda comportarse como un virus, el número sería altísimo. Si todo el universo estuviese lleno de átomos de hidrógeno, cada uno de los cuales tiene un volumen que es aproximadamente una billonésima parte de la billonésima parte de un centímetro cúbico, sólo cabrían unos 10^{108}. Por tanto, una colección de 10^{6000} secuencias diferentes de ARN está fuera de todo lo imaginable.

Mas, para nuestra fortuna, no está fuera del alcance analítico de los matemáticos. Podemos construir un entramado teórico que abarque esa colección y ponga de manifiesto las posibles relaciones entre todos sus elementos. Para conseguirlo debemos desarrollar primero una geometría —un concepto de espacio— que nos permita representar, en forma de distancias en el espacio, las diferencias informativas entre las secuencias. En el entramado geométrico, cada secuencia de nucleótidos ha de ocupar una posición única en el espacio. Esas posiciones deben reflejar también las relaciones de parentesco entre las secuencias. Con otras palabras: cada secuencia se hallaría a una unidad de distancia de todas las demás secuencias que difieran de ella en sólo un nucleótido, a dos unidades de distancia de aquellas que difieran en dos nucleótidos, y así sucesivamente.

El espacio de secuencias constituye una herramienta valiosa para entender en qué consiste una especie vírica. El término "especie" se utiliza en biología y en química. Los químicos llaman especie a un compuesto definido; por ejemplo, el trinitrotolueno o el benceno. En biología, la definición no es tan precisa. Los miembros de una misma especie deben presentar características comunes y ser al menos potencialmente capaces de producir descendencia, recombinando sus materiales genéticos. Desde un punto de vista genético, una especie biológica está representada por una diversidad ingente de moléculas de ADN distintas.

Los biólogos hablan del tipo silvestre de una especie para designar la forma que predomina en una población y se halla bien adaptada al medio donde vive. Si encontrásemos un individuo que encarnase perfectamente el tipo silvestre, su secuencia de ADN genómico especificaría al tipo silvestre desde un punto de vista genético y ocuparía un punto en el espacio de secuencias. Esta idea del tipo silvestre es la defendida en el modelo clásico de selección natural. Aunque las mutaciones se producen sin cesar, presúmese que desaparecen porque los tipos mutantes se adaptan peor que el silvestre. Puede ocurrir que un mutante tenga alguna ventaja, y en ese caso se convierte en el nuevo tipo silvestre. Cualquiera que sea el resultado, los miembros componentes de una especie tenderían a mantenerse en un punto del espacio de secuencias genómicas, o muy cerca del mismo.

Pero la teoría neutralista modificó ese cuadro. La propuso en 1960 Motoo Kimura, del Instituto Nacional de Genética en Mishima. Kimura aducía que muchas mutaciones, pensemos en las que causan diferencias en los tipos sanguíneos, no eran ni ventajosas ni perjudiciales. Habría una fracción pequeña, aunque estadísticamente definida, de mutaciones neutras que estaría continuamente reemplazando al tipo silvestre en una población. El genoma de una especie derivaría de forma incesante y aleatoria dentro de un determinado volumen del espacio de secuencias.

Pese a tales divergencias, ambas teorías, la neutralista y la darwinista

clásica, respaldan la idea según la cual las poblaciones silvestres tienden a ocupar una ubicación precisa en el espacio de secuencias tras sufrir un cambio, ya sea ventajoso o neutro. Una y otra teoría suponen también que las mutaciones advienen a ciegas, con independencia de su valor selectivo. Las mutaciones neutras o ventajosas no se producen con más frecuencia que las perjudiciales.

Esa opinión, sin embargo, no es compartida por la moderna teoría cinética de la evolución molecular, ni está respaldada por experimentos realizados con virus. Después de todo, la selección evolutiva es consecuencia de la capacidad que tiene un genoma de autorreplicarse. Imaginemos un caso en el que el proceso de replicación tiene una tendencia tan alta al error, que las nuevas copias que se producen no se parecen a sus progenitoras. La población resultante se comportaría como un gas ideal, expandiéndose hasta llenar el espacio de secuencias, con una densidad muy baja. En esa población, la selección no podría confinarla ni delimitarla en ningún sentido. La población acabaría por perder su integridad.

Si se redujese progresivamente la tasa de error durante la replicación, las variaciones de la población se dispersarían cada vez menos: los descendientes se parecerían cada vez más a sus progenitores. A una tasa de error crítica, el efecto de la selección sobre la población cambiaría de signo, de suerte que la fuerza expansiva de la mutación alcanzaría un equilibrio con la fuerza compresiva de la selección. El gas difuso de secuencias emparentadas se condensaría súbitamente, en una región amplia, aunque finita.

En el espacio de secuencias, esa región se ilustra con una nube cuyo centro de gravedad cae en la secuencia que originó a todas las demás. Se trata de una población de secuencias autoabastecedora, donde éstas se reproducen imperfectamente, pero lo suficiente para que se retenga una identidad colectiva a lo largo del tiempo. A la manera de las nubes reales, la nuestra no tiene por qué ser simétrica; sus prolongaciones pueden alejarse del centro, porque algunas mutaciones son más probables que otras, o pueden proporcionar valores de supervivencia mayores, que les permitan producir una descendencia más numerosa. Llamamos cuasiespecie a esa nube.

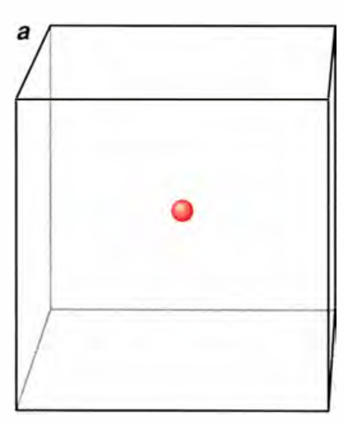
Desde un punto de vista biológico, la cuasiespecie constituye el verdadero objetivo de la selección. Todos los miembros de una cuasiespecie —no sólo la secuencia canónica— coadyuvan a perpetuar la estabilidad de la población. Lo que interesa es la aptitud o eficacia de la población entera, no la de sus individuos uno a uno. El tipo silvestre de una cuasiespecie compendia la media de los miembros componentes, y no remite a ningún individuo particular por cualificado que se halle.

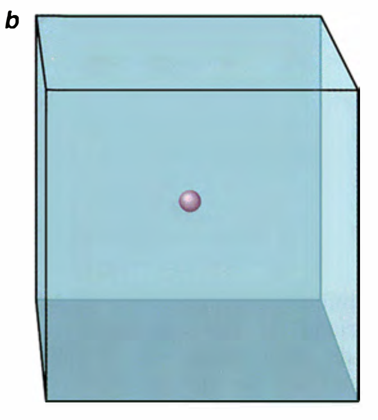
Desde un punto de vista químico, la cuasiespecie es una multitud de polímeros de ácidos nucleicos, relacionados aunque distintos. Su tipo silvestre es la secuencia canónica, que representa una media de todos los mutantes, debidamente ponderada para tener en cuenta sus frecuencias individuales.

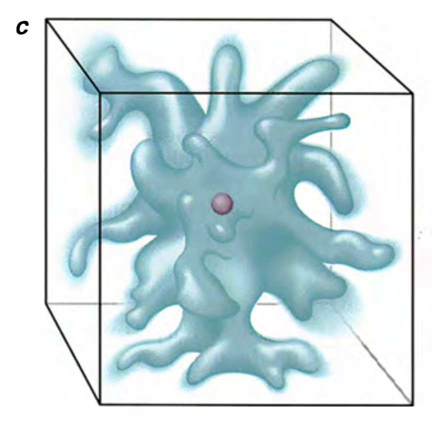
Desde un punto de vista físico, la cuasiespecie es una distribución localizada en un espacio de secuencias, que se forma y disuelve cooperativamente, de una manera muy parecida a las transiciones de fase que se observan cuando las moléculas de agua se congelan o se evaporan.

La estabilidad de la cuasiespecie está condicionada por el "umbral de error", que viene a ser una suerte de "punto de fusión" de la información genómica. La densidad de la población en cada punto del espacio de secuencias depende del valor de la aptitud o eficacia ("fitness") de esa secuencia particular. Para representar la distribución de secuencias en una cuasiespecie, el matemático trazaría un vector que reflejase la máxima expansión en la serie de ecuaciones cinéticas acopladas para todos los mutantes.

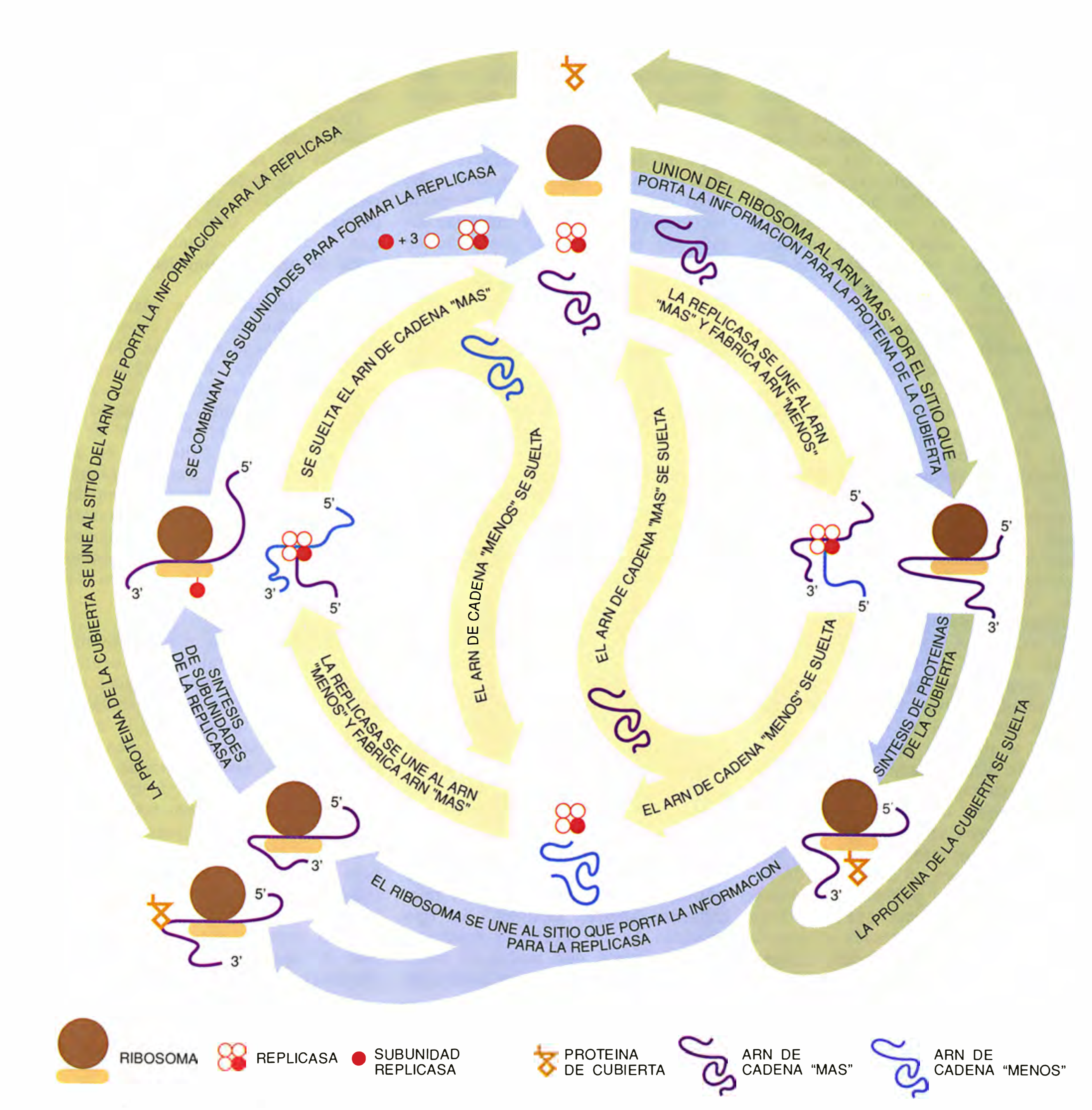
¿Por qué en este modelo los mutantes ventajosos o neutros gozan de mayores oportunidades que los deletéreos? Los nuevos mutantes aparecen en la periferia de la distribución de la cuasiespecie, donde se producen por errores durante la replicación de mutantes ya existentes. Como la población representada por un mutante en una cuasiespecie depende de su eficacia, los mutantes bien adaptados tendrán una probabilidad mayor de producir descendencia; los mutantes deletéreos no producirán descendientes. La probabilidad de encontrar un mutante bien adaptado o ventajoso aumenta en las







2. DINAMICA POBLACIONAL de un virus. Depende de la tasa de error de su proceso de replicación. En estas figuras se representan, simplificados, posibles espacios de secuencias para una población vírica. Si el proceso de replicación de un virus fuese totalmente infalible, todos los descendientes víricos ocuparían la misma posición en el espacio de secuencias (*a*). Si la replicación fuese muy imprecisa, los virus mutantes no tardarían en copar todas las posiciones del espacio de secuencias (*b*), y la población vírica perdería su integridad. Con una tasa de error intermedia, la población vírica sería una entidad coherente, parecida a una nube, centrada alrededor de la secuencia canónica original (*c*). Esa nube es una cuasiespecie.



3. HIPERCICLOS que gobiernan la replicación vírica en el interior de la célula hospedadora. Un hiperciclo consta de bucles retroactivos interconectados. En la replicación del virus de cadena “más” Qβ, por ejemplo, el ciclo reproductivo (*canela*) de información genética está controlado por un segundo ciclo (*azul*), en el que se produce una enzima replicasa vírica. Al mismo tiempo, la replicación vírica es inhibida por el ciclo que sintetiza la proteína de la cápside vírica (*verde*), que a su vez impide la formación de las subunidades de la replicasa. Entre todos esos ciclos determinan las proporciones de los diferentes componentes víricos, y por ende, la tasa de replicación del virus. En el hiperciclo pueden acumularse errores, fuente de mutaciones de los virus.

regiones del espacio de secuencias asociadas con una mayor aptitud; por ello, es alta la tendencia a producir ese tipo de mutantes bien adaptados. Los cálculos demuestran que este efecto acelera las posibilidades evolutivas de los virus muchos órdenes de magnitud, en comparación con las verdaderas mutaciones aleatorias, no sesgadas.

La tasa de error es la característica más notable de un virus, ya que determina directamente el tamaño e integridad de una cuasiespecie. Por tasa de error hemos de entender la probabilidad de que se produzca un error cuando se está copiando un nucleótido de una secuencia; depende del tipo de sustitución de nucleótido que se está operando y de la posición de dicho nucleótido en la secuencia. La posición es importante, ya que el ribosoma lee los nucleótidos de tres en tres, en codones. En la mayoría de éstos, las dos primeras posiciones bastan para especificar el aminoácido que se va a incorporar en la proteína. Las mutaciones producidas en esas dos primeras posiciones pueden, pues, hallarse sometidas a una mayor selección. Cuando hablamos de tasa de error de una secuencia vírica, aludimos a una media aplicable a todas las posiciones.

La tasa de error de un virus es inversamente proporcional, podría-

mos decir, a la longitud de su secuencia; lo que podemos cifrar en un error por secuencia replicada. Si la tasa de error fuese mucho mayor, en cada replicación, casi, se produciría una mutación inadecuada. Para una entidad que produce la descendencia, inmensa, de un virus, una tasa de error inversa a la longitud de su secuencia tiene su importancia. Consideremos un proceso típico de infección, que comienza cuando un virus se introduce en un organismo. Si no lo erradicamos, el virus se replicará. Antes de que la infección pueda detectarse, la población vírica puede haber llegado a 10^9, unas 30 generaciones. Si la tasa de error es más o menos igual a la inversa de la longitud de la secuencia, en cada generación se habrá añadido, como media, un error.

En consecuencia, dos virus cualesquiera procedentes de un individuo afectado diferirán en 30 o más posiciones de nucleótidos. Cuando se percibió la diversidad de secuencias de los VIH encontrados en un mismo paciente, se atribuyó ese polimorfismo a infecciones producidas por estirpes diferentes. Hasta que el trabajo de Simon Wain Hobson, del Instituto Pasteur de París, puso de manifiesto que las secuencias VIH presentes en los pacientes estaban emparentadas. Su trabajo confirma claramente que los virus, y en particular los virus de inmunodeficiencia, son cuasiespecies.

La proliferación de una cuasiespecie vírica es un fenómeno más complejo que la simple replicación de un tipo silvestre. La replicación vírica toma la forma de un hiperciclo: una serie de bucles entrelazados y retroactivados que describe la coevolución dirigida, en el interior celular, de genes víricos y de proteínas víricas esenciales para la replicación, cifradas por esos genes.

Michael Gebinoga, del Instituto Max Planck de Química Biofísica en Göttingen, ha cuantificado el proceso *in vivo* para el bacteriófago Qβ. Encontró pruebas de la existencia de dos ciclos de retroactivación, uno basado en la enzima replicasa, necesaria para la replicación, y otro basado en la proteína de la cápside del virus, que la limita. Las primeras moléculas de replicasa y otras proteínas producidas por la cadena "más" infecciosa son muy precisas, ya que la mayoría de las copias de los genes víricos presentes en la célula son similares a los originales. La mayoría de los errores se acumulan durante los últimos momentos del ciclo infeccioso. Por esa razón, la síntesis de la replicasa tiene lugar inmediatamente después de la infección. Sin embargo, también se replican las secuencias víricas que fabrican proteínas defectuosas, ya que la maquinaria replicativa actúa indistintamente sobre todas las cadenas. Cuando, pasados unos 40 minutos, estalla la célula de *E. coli*, libera alrededor de 10.000 partículas de fagos, de las cuales un millar, si llega, son infecciosas.

Los análisis del espacio de secuencias arrojan luz sobre la evolución de las cuasiespecies víricas. Un buen procedimiento consistiría en seguir los cambios operados en un gen vírico a lo largo del tiempo. Ello exige recoger muestras de virus durante muchos años consecutivos. Pero hay un inconveniente: incluso en los casos de los virus que mutan muy rápidamente, la cantidad de cambios que pueden acumularse en pocos años —la vida media de una tesis doctoral— es demasiado pequeña para ser significativa. El experimento, pues, no se abordaría nunca.

A mediados de los años ochenta, Peter Palese, de la Facultad de Medicina Monte-Sinaí, utilizó un procedimiento mejor. Recabó muestras de virus de la gripe de tipo A que se habían aislado y congelado durante episodios epidémicos ocurridos en los últimos cincuenta años. Con su equipo, Palese analizó la secuencia génica común de las muestras. Esa información les facilitó establecer las relaciones evolutivas entre los virus de las diferentes epidemias. El "árbol genealógico" que dedujeron ponía de manifiesto la dispersión a escala mundial de virus con un origen común, en oleadas sucesivas durante cada epidemia. Las puntas de las ramas son las muestras de los virus aislados; los nudos o conexiones entre las ramas son las secuencias canónicas de los antecesores comunes. En colaboración con Walter M. Fitch, de la Universidad de California en Irvine, Palese encontró que, en el caso de la gripe de tipo A, existía una relación lineal para los cambios observados entre dos secuencias cualesquiera, y el tiempo transcurrido desde que se separaron en la evolución. A tenor de las secuencias examinadas, cada año aparecían de dos a cuatro mutaciones. La distancia entre los nudos y las puntas de las ramas, índice de la dispersión de secuencias individuales, correspondía aproximadamente a 5 años de evolución.

Para nuestro infortunio, no hay otro ejemplo del que existan colecciones de virus que cubran medio siglo. Pero se ha podido recurrir a otras estrategias. Mientras Palese trazaba la evolución temporal de un virus, otros construían árboles evolutivos inferidos a partir de las semejanzas entre virus y estirpes víricas que abundaron en períodos de tiempo similares. Gerald Myers, del Laboratorio Nacional de Los Alamos, ha construido uno de esos árboles para la estirpe VIH-1, causante del sida, utilizando muestras recogidas de 1985 a 1987.

La diferencia principal entre el árbol del VIH-1 y el de la gripe de tipo A reside en la longitud de sus ramas. Según el esquema desarrollado por Myers, las primeras cepas de VIH-1 vinieron de Africa. Observando el árbol casi se puede trazar el viaje del virus, desde ese continente al resto del mundo. De hecho, se puede ahondar más en su curso evolutivo y descubrir parentescos entre VIH-1, VIH-2 y otras formas de virus de inmunodeficiencia en simios (VIS).

Para estimar cuándo se produjo la divergencia entre esos virus, sería útil que la separación entre las secuencias constituyera una medida del tiempo evolutivo. Pero el problema no es tan simple. Si dos secuencias largas, originalmente idénticas, mutan al azar, resulta en principio improbable que en esas dos secuencias se produzcan los mismos cambios, en las mismas posiciones. Las mutaciones harán que sus distancias, con respecto a la secuencia canónica original, aumenten, y los cambios se acumularán casi linealmente con relación al tiempo.

Con los años, sin embargo, el cúmulo de mutaciones será de tal magnitud, que algunas trocarán cambios por la situación de origen y otras mutaciones repetirán cambios producidos en la otra secuencia. De todo lo cual resultarán menos diferencias entre secuencias o la permanencia constante de éstas; además, sus distancias con respecto a la secuencia canónica original fluctuarán alrededor de un valor determinado. Traspasado cierto punto, el tiempo no prolongará la distancia. Para una secuencia genética en la que cualquiera de los cuatro nucleótidos pueda ocupar cualquier posición, esa distancia es el 75 % del total de la longitud de la secuencia.

En la práctica, no es correcto admitir la equiprobabilidad de las sustituciones. Hay limitaciones relacionadas con la eficacia o aptitud que imponen que algunas posiciones se

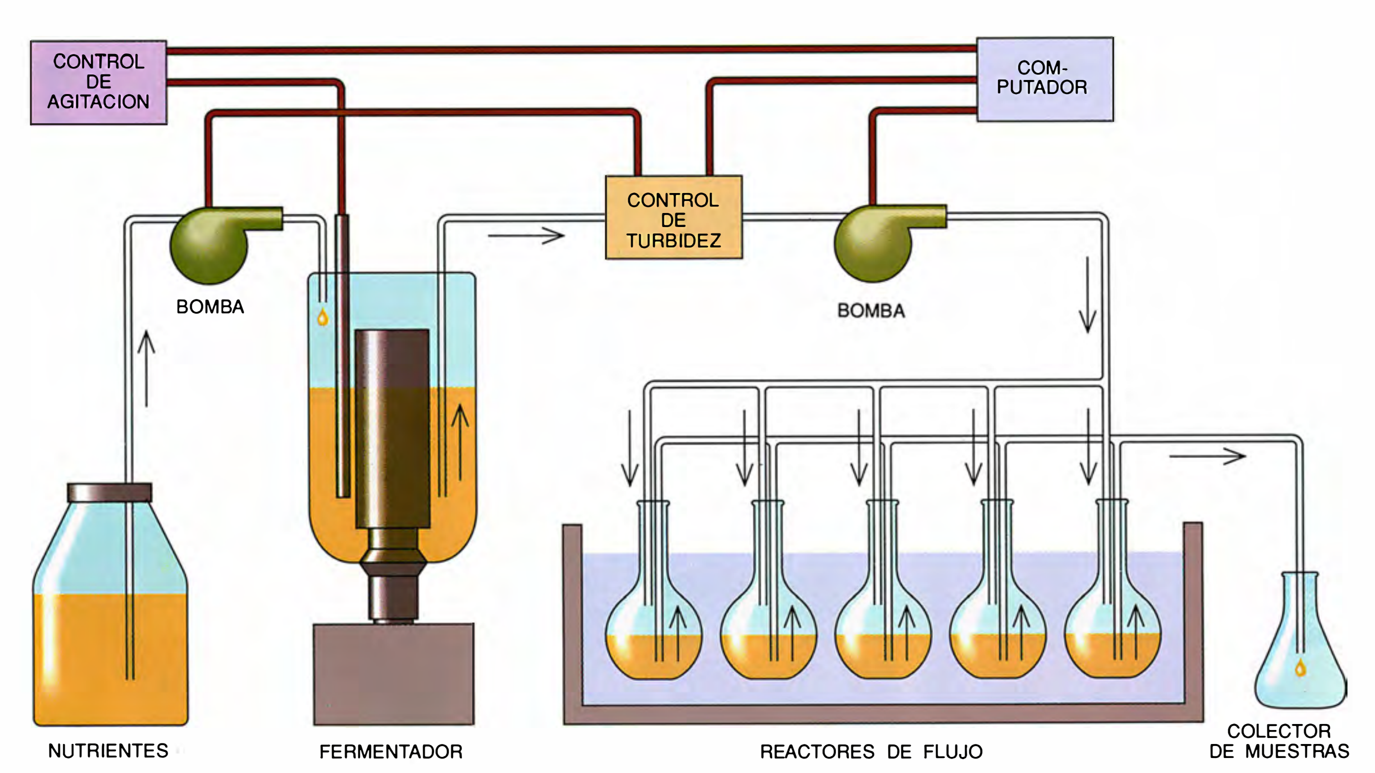
conserven casi constantes; en otras posiciones, la tasa de variación es normal, y otras, por fin, son hipervariables, vale decir, cambian rápidamente en respuesta a las presiones selectivas determinadas por el sistema inmunitario de sus hospedadores. Las posiciones constantes, variables e hipervariables evolucionarán cada una con una relación distancia-tiempo dispar. A la hora de interpretar distancias evolutivas, en los casos de divergencias antiguas, la aplicación de relaciones distancia-tiempo diferentes daría resultados muy distintos. La longitud de las ramas de los dendrogramas no puede, pues, mostrar con exactitud la magnitud de la evolución de los virus.

Sí pueden hacerlo, por contra, los diagramas de espacios de secuencias. Mis colaboradores Katja Nieselt-Struwe y Ruthild Winkler-Oswatitsch, de Göttingen, Andreas Dress, del departamento de matemáticas de la Universidad de Bielefeld, y yo hemos trabajado en esa línea. Y hemos ideado un procedimiento matemático para analizar las relaciones en una cuasiespecie. Lo llamamos geometría estadística del espacio de secuencias. Este análisis nos permite determinar la frecuencia de determinados tipos de cambios en diferentes posiciones. Divide las posiciones de la secuencia vírica en constantes, variables o hipervariables. A partir de esa información podemos deducir, con bastante seguridad, los diferentes linajes víricos que han existido y la frecuencia de los distintos tipos de mutaciones.

¿Qué revelan las geometrías estadísticas sobre los virus de la gripe tipo A, polio-1 y el de inmunodeficiencia? En el caso del virus de la gripe A, la probabilidad de que se produzcan mutaciones en paralelo, o que reviertan cambios anteriores, es pequeña. Como indicaban los estudios de Palese, la diferencia entre las estirpes de virus aumenta casi linealmente con el tiempo. Esos datos también permiten hacer una interesante predicción. Si todas las posiciones mutables del virus cambiasen con la tasa indicada, el virus de la gripe perdería su identidad en unos cuantos siglos. Si consideramos que algunas posiciones se mantendrán constantes, habrá que decir que el virus de la gripe tipo A seguirá siendo con toda probabilidad un patógeno (para sobrevivir necesitará infectar a los humanos), pero no podremos predecir cuál será su patología exacta.

Para el virus de la polio-1, el panorama diverge por completo. En el segmento de la secuencia estudiado, los nucleótidos que ocupan las posiciones primera y segunda de cada codón no suelen cambiar. En una cuasiespecie, la selección debe eliminar las mutaciones en esas posiciones. Pero los nucleótidos de la tercera posición de cada codón se mueven en un rango de aleatoriedad muy alto. En razón de ello, aunque los poliovirus presentan aproximadamente la misma tasa de error que el virus de la gripe, sólo aparecen en la cuasiespecie aquellas mutaciones que no provocan cambios de aminoácidos. De ahí el grado elevado de conservación que observamos en las proteínas de los poliovirus.

Los virus de inmunodeficiencia tienen una geometría estadística distinta. Las tres posiciones de los codones son aleatorias para todos los tipos de cambios. Hemos confirmado también la realidad de los sitios constantes, variables a hipervariables en el gen para una proteína de superficie del VIH. Información que nos ha facultado para estimar cuánto tiempo han tardado los virus de la



4. "MAQUINAS EVOLUTIVAS" de diversos tipos, utilizadas en el laboratorio del autor para estudiar los cambios "escurridizos" que pueden sufrir las poblaciones de virus sometidas a presiones evolutivas. En esas máquinas, se crean sistemas de cultivos celulares donde medran los virus, bajo condiciones estrictamente controladas, durante muchas generaciones. Los nutrientes son bombeados a un fermentador, donde crecen las células hospedadoras, como la bacteria *E. coli*. Estas células son posteriormente bombeadas a un conjunto seriado de recipientes, el reactor de flujo, donde los virus parasitan a sus hospedadores. De estos reactores de flujo se extraen muestras de virus para su análisis posterior. Un computador regula los componentes del sistema, como el bombeo y la agitación del medio, que determinan las condiciones de crecimiento y la presión selectiva sobre los virus.

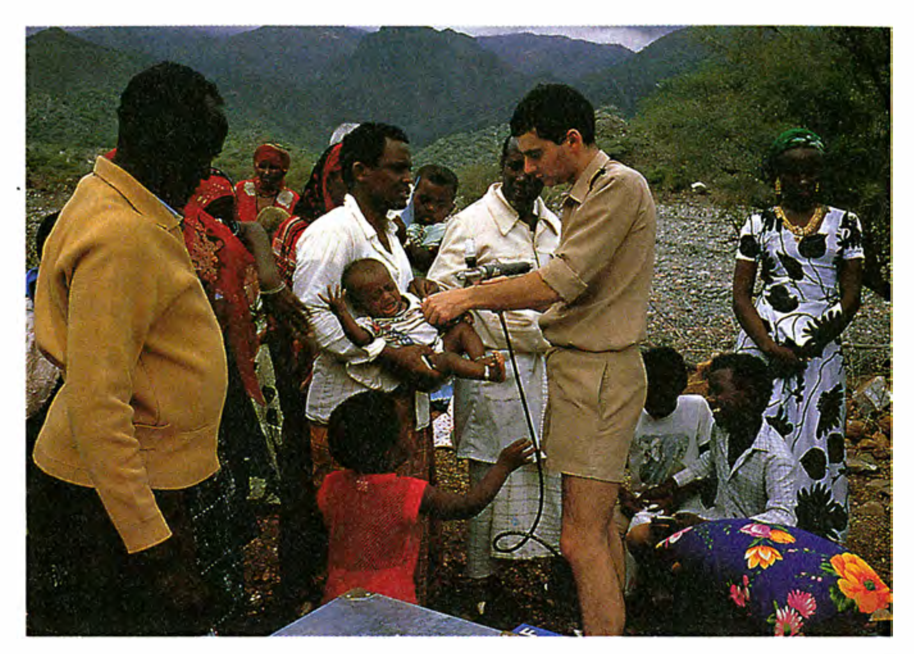
inmunodeficiencia en alcanzar el grado de divergencia que ofrecen.

Aproximadamente el 20 % de las posiciones son constantes; serían, al parecer, las necesarias para que el VIH funcione como retrovirus. Establecen que el VIH desciende de una antigua familia vírica. Las posiciones variables, que rondan el 70 por ciento, tienen una vida media de aproximadamente 1000 años (siglo más, siglo menos). Diríase que confieren al VIH sus características específicas. Muchas de esas posiciones difieren en el VIH-1, VIH-2 y VIS, señal de que se separaron hace mucho tiempo. Para nosotros el proceso aconteció hace entre 600 y 1200 años (si no más, porque podría haber posiciones constantes escondidas en los datos). De lo que se deduce que, pese a lo contrario sugerido por las curvas epidemiológicas, el VIH no es un virus nuevo, si bien su patogenicidad pudo haber variado con los siglos.

Unas 200 posiciones del genoma del VIH —un 10 % del total— son hipervariables y cambian cada treinta años, aproximadamente. Responsables de la gran variabilidad que permite al VIH eludir la acción del sistema inmune de sus hospedadores, pueden ser asimismo culpables, en buena medida, del daño que los virus causan al sistema inmunitario. Según la teoría avanzada en 1992 por Robert M. May y Martin Novak, de la Universidad de Oxford, el VIH utiliza su capacidad de variar para burlar la respuesta inmunitaria de sus hospedadores.

El número de secuencias diferentes que resultan de las mutaciones en los sitios hipervariables excede con mucho la capacidad del sistema inmunitario de generar linfocitos. Si en 30 años el VIH puede cambiar todos sus sitios hipervariables, el agotamiento del sistema inmunitario será sólo cuestión de tiempo. El virus acabará produciendo mutantes que escapen de las defensas, por la razón potísima de que los blancos de su infección son los linfocitos *T*, encargados de controlar la respuesta inmunitaria.

Las simulaciones realizadas en el ordenador por el grupo de Oxford verifican esas predicciones. Esa teoría, basada en la naturaleza cuasiespecífica de los virus, explica también satisfactoriamente el período de latencia, de una década más o menos, que suele producirse entre la infección vírica inicial y el estadio fatal de la enfermedad, cuando el sistema inmunitario se derrumba de golpe. El VIH puede tardar ese intervalo en agotar los recursos adaptativos del sistema inmunitario. Nuevos experimentos someterán a prueba la idoneidad de nuestra interpretación.



5. LA VACUNACION ha sido extraordinariamente eficaz en el control de la polio y otras enfermedades. Como las proteínas de los poliovirus cambian muy poco a lo largo del tiempo, no resulta difícil encontrar buenas dianas inmunológicas. Contra los virus más mutables, como el del sida, la vacunación es mucho menos eficaz.

Los datos de geometría estadística orientan también en la lucha contra el VIH y otros virus. La vía acostumbrada para eliminar los virus en los individuos afectados pasa por estimular, activar o apoyar al sistema inmunitario; tenemos el ejemplo de las vacunas. El conocimiento de la flexibilidad de los virus para diversificarse sugiere tres nuevas estrategias, que deben ser exploradas para mejorar las vacunas. Trata la primera de encontrar rasgos inmunitarios estables en la cuasiespecie vírica contra los que puedan dirigirse anticuerpos monoclonales específicos. La segunda es crear anticuerpos que actúen contra la amplia gama de virus mutantes más probables. Consiste la tercera en descubrir, en una fase precoz de la infección, los mutantes escurridizos y contrarrestarlos con agentes específicos antes de que puedan proliferar.

Dependerá del tipo de virus la oportunidad de uno u otro enfoque. El sistema inmunitario aprende en seguida a reconocer las características casi constantes de las proteínas del poliovirus; éste no tiene posibilidades de medrar si se introduce en un hospedador vacunado. La eficacia real de esa protección se ha puesto de manifiesto recientemente, cuando se descubrió que la estirpe suave del virus polio-1 utilizada para preparar las vacunas difería del tipo silvestre patógeno en sólo dos posiciones nucleotídicas. No es raro que algunos de los poliovirus presentes en una vacuna puedan mutar a estado patógeno dentro de un hospedador. Sin embargo, antes de que se produzcan esas mutaciones el sistema inmune ya ha protegido al hospedador. El éxito de la vacuna de Sabin, salvando la vida de innumerables niños, es incuestionable.

Con otros virus, el de la gripe entre ellos, las cosas difieren bastante. Los objetivos de la respuesta inmunitaria contra la gripe cambian sin cesar. Y aunque el sistema inmunitario acabe por reprimir la infección vírica, no existe una protección permanente; la gente puede contraer la gripe muchas veces, y las vacunas deben sustituirse cada pocos años por otras contra las estirpes predominantes. John J. Holland, de la Universidad de California en San Diego, y Esteban Domingo, de la Universidad Autónoma de Madrid, han observado que los virus responsables de la fiebre aftosa y de la estomatitis vesicular, una infección de las membranas bucales en el ganado, se comportan de una manera parecida. El VIH, con sus muchas posiciones variables e hipervariables, muta incluso con mayor rapidez y radicalidad. Contra tales infecciones, las vacunas no ejercen, quizás, efectos perdurables.

Pero las vacunas son sólo una de las varias formas de lucha contra los virus. La administración de drogas que bloquean la replicación vírica es una terapia usual; en el caso del sida, todavía la única capaz de suavizar los efectos de la infección. En teoría, se podría administrar a los pacientes cadenas artificiales de ARN que impidiesen o eliminasen las infecciones víricas. Esas moléculas de ARN impedirían la replicación del virus, emparejándose con el ARN vírico, o compitiendo con él por enzimas esenciales. También podrían introducirse en la célula hospedadora, mediante técnicas genéticas, factores específicos que obstaculizaran la replicación del virus. Pero estamos hablando de medidas que podrían comportar efectos secundarios nocivos o cuya aplicación requiere salvar problemas técnicos importantes.

Hay una complicación añadida: los virus pueden mutar y orillar esos obstáculos. En mi laboratorio, Björn Lindemann ha ensayado una estrategia antivírica, basada en el mecanismo replicativo del bacteriófago Qβ. Introdujo en las células el gen de la proteína de la cubierta del virus. Las células se volvieron resistentes a la infección porque la proteína de la cubierta, que es un regulador natural de la replicación del fago, bloqueaba la transcripción de los genes víricos.

Pero la estrategia no consiguió una virtualidad indefinida. Transcurrido cierto tiempo, el bacteriófago se adaptó, mutando a una forma que ignoraba la señal procedente de la proteína de la cubierta. Lindemann demostró el fenómeno, utilizando una de las "máquinas evolutivas" automáticas desarrolladas recientemente en mi laboratorio. En esos aparatos, los virus crecen en células hospedadoras durante períodos largos de tiempo, bajo condiciones de presión selectiva suave. La biotecnología evolutiva, o evolución molecular aplicada, como se designa frecuentemente, es un campo de investigación nuevo pero muy activo, que puede tener muchas aplicaciones en las nuevas estrategias antivíricas (véase "Evolución molecular dirigida", por Gerald F. Joyce; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 1993).

La estrategia capaz de hacer frente a las maniobras evasivas de los virus será aquella que explote su naturaleza como cuasiespecie y socave las propias bases de su existencia. Incluso en las cuasiespecies eficaces, sólo es viable una pequeña fracción de las secuencias víricas presentes en la célula hospedadora. Si se pudiese aumentar moderadamente la tasa de error de los virus, lo suficiente como para cruzar el umbral crítico de fallo que define su cuasiespecie, experimentarían una catastrófica pérdida de información. La cuasiespecie vírica se desarticularía, porque produciría demasiados mutantes inviables.

Con drogas inductoras de mutaciones, Domingo y Holland han demostrado que esta estrategia funciona contra el virus que produce la fiebre aftosa. Para elevarlo a terapia, la droga debe, sin embargo, cambiar sólo la tasa de error de la replicasa vírica, y no la de las enzimas necesarias para el normal funcionamiento del hospedador. Un mejor conocimiento de los mecanismos de la replicasa permitirá considerar dicha posibilidad de bloquear la infección vírica. Esta estrategia sería exactamente la contraria de las terapias de inmunización, pensadas para impedir la aparición de mutantes escurridizos.

Sabemos todavía muy poco sobre el origen de los virus y su papel en la evolución de la biosfera. Los virus vienen y se van. Algunos se adaptan y otros desaparecen. La innegable realidad es que aproximadamente seis millones de personas en todo el mundo están infectadas con el VIH. La caja de Pandora aún sigue abierta y desparramando nuevos males. Pero la ciencia avanza y nos da pie para pensar que, como en el mito, la esperanza continúa a buen recaudo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MOLECULAR QUASI-SPECIES, Manfred Eigen, John McCaskill y Peter Schuster en *Journal of Physical Chemistry*, vol. 92, n.º 24, páginas 6881-6891; 1 de diciembre de 1988.

ROLE OF GENOME VARIATION IN VIRUS EVOLUTION. Manfred Eigen y Christof K. Biebricher en *RNA Genetics*, vol. 3: *Variability of RNA Genomes*. Dirigido por Esteban Domingo, John J. Holland y Paul Ahlquist. CRC Press, 1988.

HOW OLD IS THE IMMUNODEFICIENCY VIRUS? Manfred Eigen y Katja Nieselt-Struwe en *AIDS*, vol. 4, suplemento 1, páginas S85-S93, 1990.

STATISTICAL GEOMETRY ON SEQUENCE SPACE, Manfred Eigen y Ruthild Winkler-Oswatitsch en *Molecular Evolution: Computer Analysis of Protein and Nucleic Acid Sequences*. Dirigido por Russell F. Doolittle. Academic Press, 1990.

THE HYPERCYCLE: COUPLING OF RNA AND PROTEIN BIOSYNTESIS IN THE INFECTION CYCLE OF AN RNA BACTERIOPHAGE. M. Eigen, C. K. Biebricher, M. Gebinoga y W. C. Gardiner, Jr., en *Biochemistry*, vol. 30, n.º 46, páginas 11005-11018, 19 de noviembre de 1991.

Dinosaurios polares de Australia

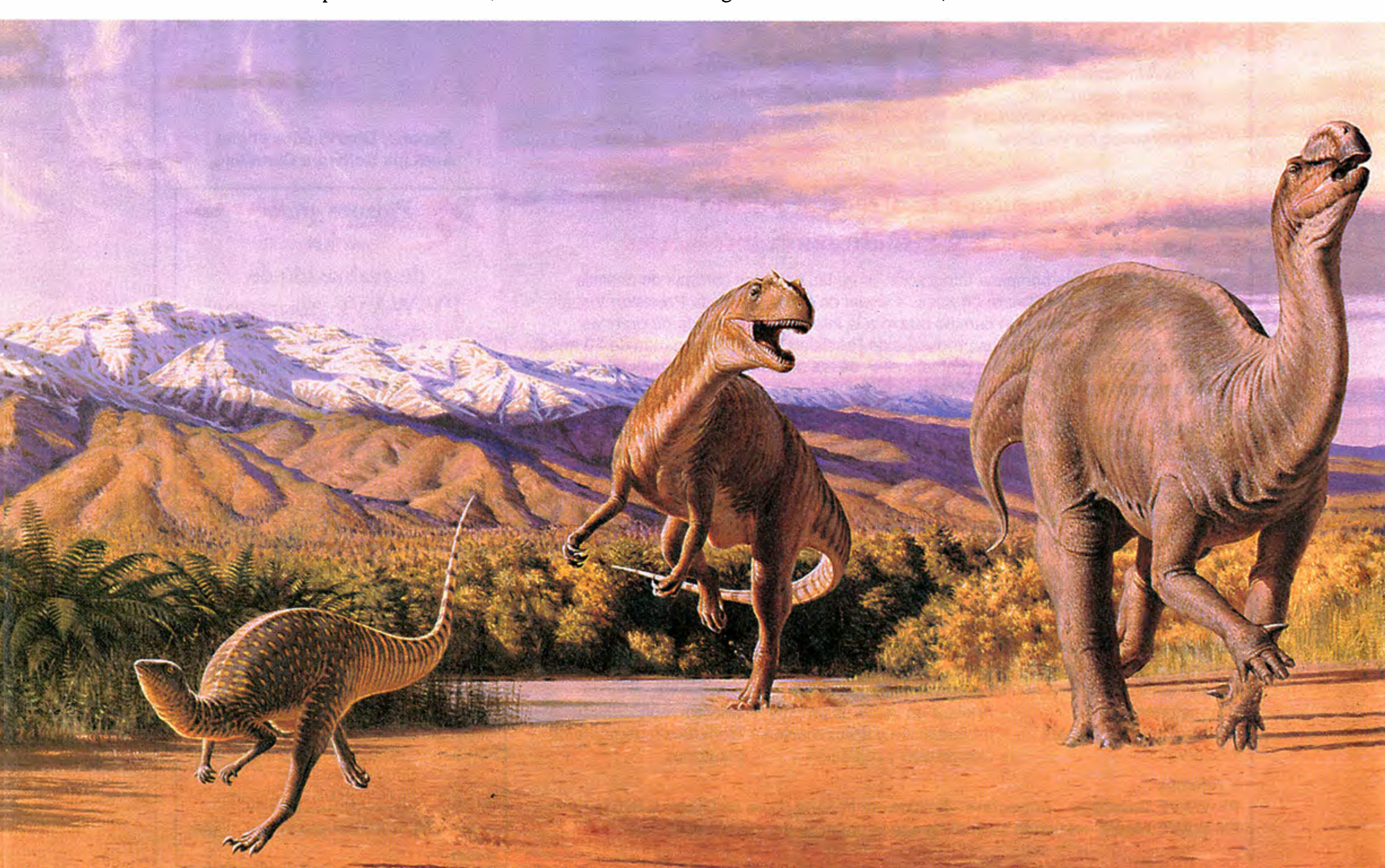
Ante la vigorosa capacidad de visión nocturna que les distinguía y la adquisición de sangre caliente, resulta obligado preguntarse si lograron sobrevivir a las condiciones de frío intenso que reinaron en las postrimerías del Cretácico

Patricia Vickers-Rich y Thomas Hewitt Rich

Durante el Cretácico inferior, hace unos 100 millones de años, Australia limitaba con la Antártida, situada ésta, como hoy, a horcajadas del polo Sur. La punta sureste de Australia, el estado actual de Victoria, caía dentro del Círculo Antártico. En aquel tiempo, se alojaba allí una comunidad de animales y plantas que vivían bajo unas condiciones climáticas sin parangón con las actuales. La temperatura media, aunque baja, parece haber sido templada, a pesar de que el sol no brillara durante los largos inviernos.

En ese ambiente insólito medraron muchos linajes de dinosaurios cuando habían ya sido borrados del resto del planeta. De ese grupo, por lo menos un componente se adaptó al frío y a la oscuridad, fenómeno de interés en sí mismo y en lo que enseña sobre el decurso de una época biológica. Si el enfriamiento global eliminó a los dinosaurios, como han sugerido muchos paleontólogos, entonces las especies australianas fueron las que sobrevivieron durante más tiempo. ¿Hemos de admitir que la adaptación a un clima casi marginal les ayudó a resistir la dureza de un frío para el que las especies de otros continentes no estaban preparadas?

A diferencia de las plantas fósiles del Cretácico del sureste de Australia, estudiadas desde hace más de un



1. LOS DINOSAURIOS AUSTRALIANOS florecieron en el sureste del estado de Victoria durante el Cretácico inferior, cuando la región se encontraba dentro del Círculo Antártico. Este cuadro ilustra seis especies que dejaron fósiles allí y una séptima —el gran

siglo, los animales no habían recibido la atención de los investigadores hasta anteayer. Cierto es que, hacia 1900, el geólogo William Hamilton Ferguson encontró dos huesos que desencadenarían más tarde una fructífera inquisición paleontológica: el diente de un pez pulmonado y la garra de un dinosaurio carnívoro, atribuido al género *Megalosaurus*. Pero no se registraron más hallazgos durante los siguientes setenta años, y esos restos permanecieron olvidados en un armario del museo de Victoria. En 1978, dos alumnos de la Universidad Monash, Tim F. Flannery y John A. Long, descubrieron, cerca del yacimiento original de Ferguson, varios huesos de dinosaurios incluidos en una dura matriz de areniscas y limos del Cretácico inferior.

La nueva animó a los paleontólogos a excavar en distintas localidades costeras. En 1980 encontramos un sedimento muy rico en las montañas Otway; el gobierno de Victoria, a sugerencia nuestra, le puso el nombre de Ensenada de los Dinosaurios. Aquí, con la ayuda de entidades diversas y particulares voluntarios, hemos venido trabajando, durante tres meses al año, con cincel y martillo y, si no había más remedio, con dinamita que nos abriera túneles en los estratos fosilíferos.

La Ensenada de los Dinosaurios y otros yacimientos de similares características se formaron a medida que las violentas corrientes estacionales iban recogiendo huesos y plantas flotantes de las llanuras anegadas y los depositaban en el cauce de canales fluviales someros. Estos depósitos aparecen a lo largo de la costa sur del estado de Victoria, porque sólo allí el oleaje podía exponer los sedimentos acumulados en los valles de rift cuando Australia y la Antártida comenzaron a separarse, lo mismo que otros fragmentos del supercontinente de Gondwana. Se han hallado, tierra adentro, dos yacimientos fósiles del mismo período, uno en sedimentos dejados bajo condiciones menos violentas en el fondo de un lago antiguo. Este yacimiento ha proporcionado algunos especímenes conservados en un estado óptimo.

Conviene tener presente que el conocimiento de estos dinosaurios del sureste australiano se basa en unos 5000 huesos y dos esqueletos parciales. Pero sólo algunos cientos de esos huesos pueden asignarse a especies o géneros, aunque lo que falta en número se compensa con creces en interés científico.

Los esfuerzos de interpretación que se están llevando a cabo tienen que ver con la estimación de la temperatura, para lo cual se han utilizado dos métodos. El grupo encabezado por Robert T. Gregory ha deducido

PATRICIA VICKERS-RICH y THOMAS HEWITT RICH forman un matrimonio de paleontólogos. Vickers-Rich enseña paleoecología en la Universidad Monash de Melbourne. Le interesan, en particular, los paleoambientes únicos y los cambios bióticos rápidos. Rich, conservador del museo de Victoria en Melbourne, es especialista en mamíferos primitivos y dinosaurios ornitisquios.



iguanodóntido *Muttaburrasaurus*— que ha sido hallada en Queensland, mucho más al norte. La escasez de dinosaurios polares de gran talla puede ser real o simple producto del proceso selectivo de conservación de huesecillos.





2. EL SUPERCONTINENTE SUR empezó a fragmentarse hace más de 100 millones de años con la formación de un valle de rift entre Australia y la Antártida (*izquierda*). Los canales fluviales del valle recogían huesos arrastrados desde las planicies inundadas. Estos huesos, junto con limos y arcillas, constituyeron las formaciones fosilíferas de la Ensenada de los Dinosaurios (*derecha*).

el paleoclima de Australia a partir de la relación de ^{18}O a ^{16}O presente en las rocas; calculan que la temperatura media anual se aproximaría a los cero grados Celsius, con un máximo de ocho. Son los valores que se registran hoy en Hudson Bay, Saskatchewan (cero grados), y en Minneapolis y Toronto (ocho grados).

Robert A. Spicer y Judith Totman Parrish infieren las temperaturas a partir de la estructura de las plantas fósiles; cifran la temperatura media en torno a los 10 grados centígrados. De su trabajo se desprende que en la Australia polar medraron coníferas, ginkgos, helechos, cicadáceas, briófitos, equisetos y algunas angiospermas, identificadas por análisis del polen. Las angiospermas comenzaban por entonces la colonización de nuevos nichos. Empezarían por la explotación de ecosistemas inestables de los valles de rift que se formaron durante la disgregación del supercontinente.

Los perennifolios, que proporcionaban alimento a lo largo de todas las estaciones, tenían recias cutículas y otros rasgos estructurales idóneos para la resistencia al frío o a la sequía (quizá provocada por heladas invernales). Las plantas deciduas ofrecen otros indicios climáticos: parecen haber perdido todas sus hojas de golpe, por culpa de la obscuridad o el frío. No puede decirse, sin embargo, que la sequía constituyera un azote constante; el registro sedimentario y la abundancia de helechos y briófitos abogan por unas condiciones húmedas durante todas las estaciones, salvo quizás en invierno.

Si la estimación al alza de la temperatura media es la correcta, Australia habrá gozado de clima templado y habrá estado sujeta a un período de continua oscuridad en el año, combinación que ya no se da en ninguna parte del globo. La noche invernal duraba de seis semanas a cuatro meses y medio, según la paleolatitud real. Debido a que la temperatura mínima se hallaría muy por debajo de la media, la mayoría de los vertebrados habrían vivido en los límites de su umbral térmico; recordemos, por ejemplo, que los peces pulmonados no podrían medrar ahora en aguas de temperatura inferior a los 10 grados C.

Ahora bien, si la hipótesis correcta es la que daba un valor menor a la temperatura media, no será tarea fácil entender el funcionamiento de aquella paleocomunidad. Antes de abordar la cuestión, tendrá que demostrarse su realidad. Para acotar mejor la estimación de la temperatura media anual, se ha creado un equipo multidisciplinar que está comparando datos procedentes de la flora, la geoquímica y otras fuentes.

Pero no hay nada que sea, en la paleofauna australiana, lo que el koala representa para la caracterización de la fauna actual. Aunque las especies y los géneros fueron locales, pertenecían a familias cosmopolitas. Alcanzaron un grado de adaptación notabilísimo, que les permitió sobrevivir mientras desaparecían sus parientes de otras regiones.

Entre tales anacronismos —o especies relictas— se encuentran los anfibios laberintodontos, antepasados de nuestros anfibios y reptiles. Los paleontólogos suponían que el grupo se había extinguido en el Jurásico, hace unos 160 millones de años. Sin embargo, a lo largo de los últimos 15 años, Michael Cleeland y Lesley Kool hallaron tres mandíbulas del grupo en sedimentos victorianos del Cretácico inferior. Dos de las mandíbulas eran inconfundibles: los dientes presentaban la típica estructura laberíntica del esmalte (de ahí su nombre taxonómico). Hubo, pues, una especie de laberintodonto grande, por lo menos, que vivió en la Australia polar hace 115 millones de años, millones de años después de que el grupo se extinguiera en otras partes.

¿Cómo resistieron? El rigor del clima evitó que tuvieran que competir con los cocodrilos, pero adaptados a las condiciones que dominaron en el sureste australiano hasta el ascenso de temperaturas, fenómeno que se produjo durante los últimos cinco millones de años del Cretácico inferior. Basamos el aserto anterior en un dato claro: los actuales cocodrilos se mueren en aguas cuya temperatura esté por debajo de los 10 grados, mientras que ciertas ranas y salamandras perviven en aguas de nieve fundida.

Sobrevivió también a los suyos *Allosaurus*, un terópodo carnívoro. En cualquier otra zona del planeta, el animal medía sus cinco metros de altura; en el sureste australiano, sin embargo, no superaba los dos metros, algo más que el hombre. Este

“pigmeo” es el alosaurio más reciente, que se sepa. No está determinado que la especie perviviera gracias al nicho ecológico que el frío clima le hubiera reservado. El descubrimiento de juveniles (aunque no cáscaras de huevos todavía) sugiere que estos dinosaurios no visitaban los aledaños polares de forma esporádica, sino que vivían en esa vecindad la mayor parte del año, buscando allí abrigo para las crías durante el período de máxima luz solar.

Pero no todos los dinosaurios eran, como los alosaurios, los últimos de la estirpe. Algunos iniciaron el linaje. Dos familias por lo menos, si no cuatro, podrían tener allí las formas primigenias, o casi. Mencionemos, por ejemplo, a los ornitomimosaurios, carnívoros del tamaño y apariencia de un avestruz; manifiestamente primitivos, están entre los más antiguos del grupo; sólo una especie del Jurásico superior de Africa oriental precede al espécimen australiano. Las extremidades inferiores, largas y delgadas, les convertía en las gacelas del mundo de los dinosaurios, capaces de escapar a la carrera de sus depredadores. Los ornitomimosaurios se originaron probablemente en Gondwana y se propagaron hacia el norte para unirse a las faunas cretácico-superiores de Norteamérica y Eurasia, donde disfrutaron de amplio éxito.

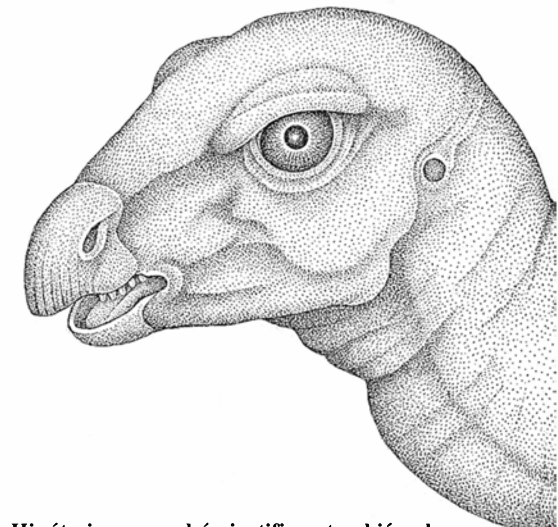
Permanecen sin identificar dos microterópodos. Uno parece un oviraptosaurio, forma depredadora de huevos conocida hasta ahora en sedimentos cretácicos más modernos de Norteamérica y Asia. Estos grupos podrían haberse originado en Gondwana.

De reciente identificación es el grupo de dinosaurios neoceratopsios, o cornamentados. Se trata de una identificación provisional, basada en dos ulnas (huesos del brazo); resulta, empero, extraña su semejanza con *Leptoceratops*, un animal del tamaño de una oveja. Con anterioridad, todo el registro de neoceratopsios procedía del Cretácico superior del hemisferio Norte, salvo unos pocos huesos de Argentina. Esta familia de dinosaurios podría haber surgido también en el supercontinente meridional.

El Cretácico inferior de Australia remodeló formas que continuaron floreciendo en otras regiones. El grupo que alcanzó mayor éxito fue el de los dinosaurios hipsilofodóntidos. De talla algo mayor que la gallina, estos bípedos ágiles, con grandes extremidades inferiores, manos pequeñas y bien desarrolladas, de cola poderosa, solían inclinarse por una dieta vegetariana. Recuerdan, por su forma y función ecológica, al ualabi.

La familia Hypsilophodontidae se extendía por los cuatro puntos cardinales, desde el Jurásico medio hasta el Cretácico superior, pero su esplendor se evidencia en los sedimentos del estado de Victoria. Aquí, no sólo les corresponde la mayoría de los restos de dinosaurios, sino que también están representados por cuatro o cinco géneros, según el criterio taxonómico empleado, y cinco o seis especies. Otras áreas, algunas beneficiadas con mayor diversidad de especies de dinosaurios, nunca albergaron a un tiempo más de tres tipos de hipsilofodóntidos. Algo debió favorecer, sin duda, la diversificación de este grupo en la Australia polar.

Reviste particular interés la adaptación patente en el molde endocraneal, magníficamente bien conservado, del hipsilofodóntido *Leaellynasaura amicagraphica* (denominado así en honor de nuestra hija, los amigos del Museo de Victoria y la National Geographic Society). El cerebro, enorme para un dinosaurio de este tamaño, presenta grandes impresiones de lóbulos ópticos, mayores que en cualquier otra especie hipsilofodóntida.



3. AGUDEZA DE LA VISION NOCTURNA de *Leaellynasaura amicagraphica*, un hipsilofodóntido (*arriba*). Se infiere de sus ojos y su cerebro. Los hipsilofodóntidos presentaban ojos grandes, gracias a los cuales pudieron medrar en un entorno de oscuridad estacional. Hipótesis que podría justificar también el desarrollo de grandes lóbulos ópticos, que destacan en este molde endocraneal (*abajo*), formado cuando el barro se solidificó dentro de un cráneo que posteriormente desapareció.



¿Qué interpretación hemos de dar a esos lóbulos? Reforzaban la visión en la oscuridad y les permitía una eficaz búsqueda de alimento durante los largos meses invernales. No les faltaría comida a quienes fueran capaces de percibirla: los herbívoros se alimentarían de perennifolios y caducifolias, y los carnívoros podrían haber cazado a los herbívoros.

En esta hipótesis se trasluce la razón por la que el grupo dominaba los ambientes polares. Los hipsilofodóntidos de cualquier lugar del mundo presentaban ojos grandes y, presumiblemente, visión aguda. Con esa facultad andarían seguros en la Australia polar. Una vez en este ambiente "protegido", los hipsilofodóntidos estarían capacitados para competir con cualquier otro en la producción de la diversidad observada de géneros y especies, quizá todos ellos con lóbulos ópticos hipertrofiados.

Si los animales buscaban su alimento de noche, debieron permanecer activos a temperaturas cercanas al punto de congelación, o incluso por debajo del mismo. Hazaña que trasciende la tolerancia al frío de cualquier reptil actual, sin excluir el tuátara de Nueva Zelanda, *Sphenodon punctatus*, que permanece activo, si puede procurarse luz solar, a cinco grados C. *Leaellynasaura* podría haber sobrevivido manteniendo constante su temperatura corporal y comiendo frecuentemente, como hacen las aves durante el invierno.

Se han hallado pterosaurios (reptiles voladores) y ankylosaurios (dinosaurios acorazados), pero el estado fragmentario de los restos aporta escasa información sobre sus modos de vida. Bastante más puede adivinarse, merced a un puñado de dientes recogido, de los plesiosaurios. Estos reptiles de largo cuello, que no son dinosaurios, merodeaban los mares, pero aquí habitaban en las aguas continentales del antiguo valle entre Australia y la Antártida. Nos recuerdan al delfín del río Ganges, uno de los pocos cetáceos de agua dulce.

No hay saurópodos. Estos gigantes, a los que pertenece *Apatosaurus* (el popular *Brontosaurus*), vivieron en aquella época en las latitudes bajas de Australia. Pero no se ha encontrado ninguno más al sur, ni en los nueve yacimientos polares de dinosaurios cretácicos de ambos hemisferios. *Rhoetosaurus*, el único saurópodo polar descubierto, es mucho más antiguo (Jurásico inferior) y procede del noreste de Australia.

El confinamiento aparente de estos grandes dinosaurios en las bajas latitudes del Cretácico de Australia puede ser real o simple artefacto del muestreo. No se trata de una cuestión baladí: las aguas que anegaron la zona con las crecidas de los ríos podrían haber arrastrado huesos pequeños y de media talla, pero no los grandes. El cuerpo de un saurópodo no flotaría, sino que se estancaría en los canales



4. DE HUESO A PIEDRA. ***Leaellynasaura*** **podría haber iniciado así su proceso de fosilización. La osamenta de un individuo podría haberse fosilizado completa *in situ*, sólo si el canal fluvial se hubiera estancado, formando un recodo o un meandro.**







5. LA DURA ROCA opone tenaz resistencia al trabajo excavador de los paleontólogos. Estos han de recurrir, a veces, a técnicas mineras para extraer las capas fosilíferas, que tienden a fracturarse a lo largo de los planos que contienen los mayores tesoros.

donde muchos especímenes acababan concentrándose, y que no tendrían más de 5 o 10 metros de ancho y 20 o 30 centímetros de profundidad.

En estos ambientes polares, debió de producirse una tendencia de fondo hacia la reducción de la talla corporal. Recuérdese que ningún hipsilofodóntido superaba la altura del hombre, y la mayoría apenas alcanzaba la altura de nuestras rodillas. El *Allosaurus* enano viene a ser como el menor de los que hemos examinado en las colecciones norteamericanas. Tampoco destaca el ornitomímido. Ni el protoceratopsio ni el ankylosaurio eran mayores que la oveja. Nuestro único registro de una forma que debió de medir hasta ocho metros de longitud es el de un fragmento de garra perteneciente a un carnívoro, similar tal vez al *Baryonix* de Inglaterra.

Tales pautas cuestionan las leyes relativas al tamaño que Bergmann y Allen formularon en el siglo XIX. De acuerdo con las mismas, los integrantes de un linaje tienden a adquirir mayores tallas y una constitución más compacta conforme va descendiendo la temperatura ambiente; tendencia que se ejemplifica en la comparación de los leones de montaña de Canadá con los pumas de América Central, y la de las poblaciones humanas de las regiones tropicales con las subárticas.

La verdad es que el tamaño corporal está determinado también por otros factores, en particular por la extensión del territorio donde vive la población. Los que habitan en islas son menores que sus parientes continentales; a este respecto, hubo elefantes enanos en las antiguas islas del Mediterráneo y se han hallado mamuts pigmeos en sedimentos insulares, de unos 4000 años de antigüedad, en la costa norte de Siberia. El enanismo podría ser una respuesta a la presión de selección para incrementar el número de individuos y asegurar así que la especie sobreviva en un área restringida. Se trata de un fenómeno observado también en las penínsulas, y la antigua zona sureste de Australia lo fue del continente de Gondwana.

Los dinosaurios de esta península se hallaban virtualmente atrapados en el confín del mundo. Su huida hacia el norte estaba cerrada por un inmenso mar interior, que sólo podían salvar recorriendo cientos de kilómetros en dirección oeste antes de doblar con rumbo norte. Después de este tremendo esfuerzo disfrutarían, como mucho, de una hora de sol diaria durante el invierno. La migración tendría poco sentido para animales tan pequeños.

Con menores obstáculos se encontraban los dinosaurios de otro yacimiento polar que ha suministrado fósiles en abundancia: la ladera septentrional de Alaska, donde los dinosaurios disponían de un buen corredor norte-sur que les permitía migrar sin dificultad. Merece anotarse su tamaño, equiparable cuando menos al del caribú, ñu y otros animales migradores actuales.

¿Podrían los animales de tan soberbia adaptación al frío y la oscuridad haberse extinguido por causa de un invierno artificial, el que se supone siguió al cataclismo ocurrido en el tránsito del Cretácico al Terciario? Se dice que ese episodio, quizás una colisión con un cometa o asteroide o una serie de erupciones volcánicas, veló la atmósfera con una manta de polvo que impediría el paso de luz solar y provocaría un enfriamiento y una hambruna que llevarían, a la mayoría de los animales, a la muerte.

Nosotros creemos, sin embargo, que tal invierno artificial, a condición de que no se prolongase en demasía (más allá de varios meses), no habría destruido a los dinosaurios; algunos dinosaurios polares, por lo menos, habrían sobrevivido al cataclismo.

En cierta ocasión, Arthur Conan Doyle soñó con una meseta sudamericana, olvidada por el tiempo, donde los dinosaurios continuaban dominando. Los hallazgos de este año, con mamuts enanos que pervivieron hasta épocas recientes en las islas costeñas de Siberia, conceden fuerza a esa idea. Si los dinosaurios encontraron un paraíso similar para continuar con su reinado, pensamos que la Gondwana polar, con el sureste de Australia incorporado, es una buena región para tal búsqueda.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

EVIDENCE FOR LOW TEMPERATURES AND BIOLOGIC DIVERSITY IN CRETACEOUS HIGH LATITUDES OF AUSTRALIA. P. V. Rich, T. H. Rich, B. E. Wagstaff *et al.* en *Science*, vol 242, páginas 1403-1406; 9 de diciembre de 1988.

OXYGEN ISOTOPIC COMPOSITION OF CARBONATE CONCRETIONS FROM THE LOWER CRETACEOUS OF VICTORIA, AUSTRALIA. R. T. Gregory, C. B. Douthitt, I. R. Duddy *et al.*, en *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 92, n.º 1, páginas 27-42, febrero de 1989.

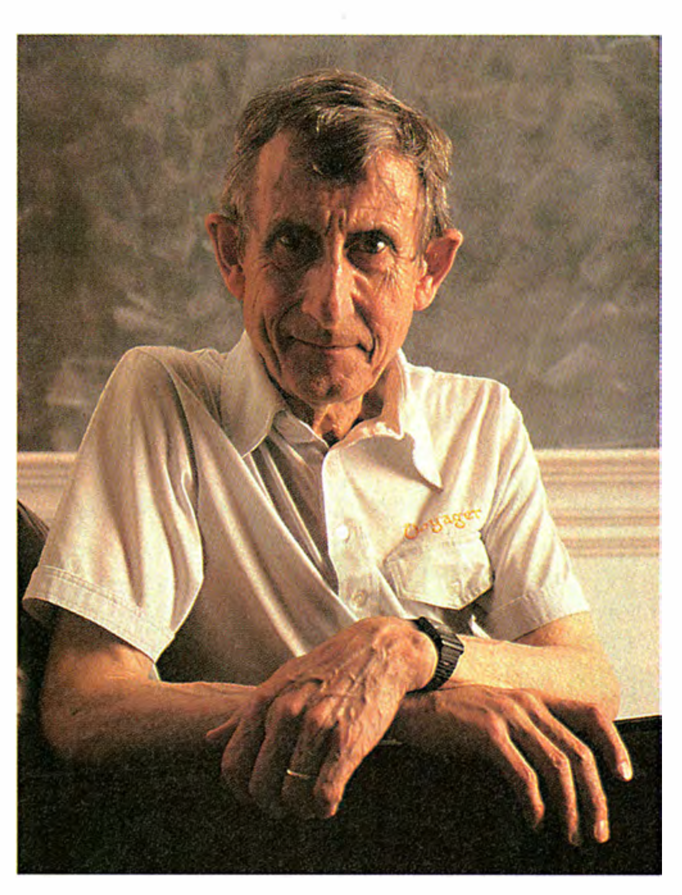
POLAR DINOSAURS AND BIOTAS OF THE EARLY CRETACEOUS OF SOUTHEASTERN AUSTRALIA. T. H. Rich y P. V. Rich en *National Geographic Research*, vol. 5, n.º 1, páginas 15-53; invierno de 1989.

CONTINENTAL CLIMATE NEAR THE ALBIAN SOUTH POLE AND COMPARISON WITH CLIMATE NEAR THE NORTH POLE. J. T. Parrish, R. A. Spicer, J. G. Douglas *et al.* en *Geological Society of America, Abstracts with Programs*, vol. 23, n.º 5, página A302; Congreso Anual, 1991.

John Horgan

FREEMAN J. DYSON: *fuera de la corriente*

Para algunos físicos de partículas, Freeman J. Dyson es una figura más bien trágica. Recuerdan que, a principios de los años cincuenta, este científico británico estaba en el centro mismo de la especialidad, forjando, codo a codo con Richard P. Feynman y otros titanes de la física, la electrodinámica cuántica. Hay quienes creen que Dyson se mereció el Nobel o, por lo menos, un mayor reconocimiento, y que la decepción, y quizás una mala racha posterior, le llevaron a perderse en empresas que le quedaban pequeñas. "Freeman tiene que estar siempre fuera de la corriente dominante", dice un físico teórico.



Uno de los dichos favoritos de Dyson es "Dios está en los detalles"

El sonríe con los labios apretados cuando le menciono estos juicios en su despacho del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, donde ha permanecido durante 40 años. Me responde, como suele hacer, con una anécdota. Cuenta que cuando nombraron director de los Laboratorios Cavendish, pertenencientes a la Universidad de Cambridge, a Lawrence Bragg, éste cambió la línea de investigación que se seguía allí, abandonando la física nuclear —a la que se debía la sólida reputación de la institución— para adentrarse en terrenos desconocidos. "Todo el mundo pensaba que Bragg, al sacar el Cavendish de la corriente dominante de la época, iba a destruirlo", dice Dyson. "Pero fue, qué duda cabe, una decisión maravillosa, porque gracias a ella el laboratorio se dedicó a la biología molecular y a la radioastronomía, las dos cosas que iban a dar fama a Cambridge en los treinta años siguientes."

Dyson se ha pasado la vida cambiando de orientación, siempre hacia tierras desconocidas. Es seguramente por sus libros por lo que más se le conoce. El primero, unas memorias tituladas *Disturbing the Universe*, apareció en 1979. Sus escritos son un elogio de la variedad. "El principio de máxima diversidad", escribió en *Infinite in all directions*, de 1988, nos garantiza que "cuando las cosas se vuelven anodinas, surge siempre algo que nos impide caer en la rutina."

Tiene 69 años, y es flaco, todo piel y nervios, de nariz ganchuda y ojos inquisitivos. Sus maneras son frías y reservadas, menos cuando se ríe: ríe largamente, agitándosele los hombros, como un chico de doce años al que le han contado un chiste verde. Es una risa subversiva, la de un hombre que insiste en que la auténtica ciencia debería ser "una rebelión contra la autoridad".

El padre de Dyson dirigió el Royal College of Music, y su madre tenía una licenciatura en derecho, profesión que nunca ejerció. A los seis años calculaba el número de átomos del sol, y a los ocho comenzó a escribir una novela de ciencia ficción. Entró en la Universidad de Cambridge en 1941, y enseguida se le consideró uno de los matemáticos más prometedores de Inglaterra.

Dyson era pacifista antes de la Segunda Guerra Mundial, pero tras la invasión de Francia decidió que tal postura era insostenible. Durante la guerra trabajó un par de años para la Royal Air Force, en busca de una manera de reducir las bajas que sufrían las tripulaciones de los bombarderos. "La burocracia entera", dice, "estaba organizada de tal manera que el comandante en jefe oyera lo que quería oír, lo mismo que pasa hoy."

Al volver a Cambridge para continuar sus estudios, Dyson fue interesándose cada vez más por la física teórica. Silvan S. Schweber cuenta, en una historia de la electrodinámica cuántica que aparecerá este otoño, cómo le reveló Dyson su decisión a un conocido de Cambridge. Mientras paseaban por el campus, éste le dijo: "La física teórica se encuentra en tal confusión, que he decidido pasarme a la matemática pura". "Es curioso", le dijo Dyson, "yo he decidido pasarme a la física teórica precisamente por la misma razón."

En 1947, Dyson marchó a la Universidad Cornell para estudiar bajo la dirección del gran Hans A. Bethe. Allí se hizo amigo de Feynman, a quien describió en cierta ocasión como "mitad genio, mitad bufón". Feynman había ideado un método peculiar para describir las interacciones electromagnéticas. A la par, Julian Schwinger, de la Universidad de

Harvard, había propuesto una teoría que parecía distinta de la de Feynman. En una serie de brillantes artículos, Dyson demostró que las dos eran matemáticamente equivalentes. Y prosiguió su trabajo hasta obtener una versión más límpida del método de Feynman.

En opinión de algunos, las contribuciones de Dyson fueron tan decisivas como las de Schwinger e, incluso, como las de Feynman. Dyson no lo acepta. "Yo clarifiqué, pero no creé". Insiste en que no guarda ningún resentimiento por no haber recibido el premio Nobel, que Schwinger y Feynman compartieron en 1965 con el físico japonés Sin-Itiro Tomonaga. "Creo que tengo suerte de no haber sucumbido nunca a esa enfermedad del Nobel que muchos de mis amigos parecen haber sufrido", dice.

A mediados de los años cincuenta Dyson se trasladó al Instituto de Estudios Avanzados, y decidió que era el momento de cambiar de campo. "La física de partículas era la disciplina en boga, y cada día llegaban montañas de prepublicaciones. Me parecía que añadir una más a la pila no merecía la pena." Abandonó así la búsqueda de una teoría unificada de la física, a la que ya nunca más volvería. "No me interesan mucho las grandes escalas", dice. "Dios está en los detalles: éste es uno de mis dichos favoritos."

Se dedicó entonces a la física del estado sólido, donde las ondas de espín —las oscilaciones de los espines atómicos en un ferroimán— absorbieron toda su atención. "Voy a fanfarronear un poco", dice, e indica que su artículo de 1956 sobre ese tema ha sido citado al menos 675 veces; hace poco, la publicación *Current Contents* lo ha incluido entre las "citas clásicas".

En 1956, cuando le nombraron consultor de General Atomics (una compañía dedicada al uso pacífico de la energía nuclear), adquirió el gusto por "ese delicioso pasatiempo" que es la ingeniería. Contribuyó a la invención de un reactor en miniatura que genera isótopos radiactivos para la medicina y la investigación. "Lo diseñamos en dos meses, y lo construimos y vendimos en dos años." Dyson obtuvo su única patente por ese reactor, que todavía se usa en todo el mundo.

Dyson dio rienda suelta a una obsesión por la exploración espacial, que le venía de antiguo, al participar en el diseño de una nave de propulsión nuclear a la que dieron el nombre de Orion. El proyecto finalizó en 1965 sin alcanzar su objetivo; Dyson piensa ahora que los cohetes nucleares "seguramente no serían demasiado buenos". Pero aún le interesa la propulsión espacial. Defiende un método consistente en el uso de un potente láser que vaporizaría agua u otras sustancias. "Tiene un fallo irreparable", admite. "Sólo sería rentable si hubiese mucho tráfico".

A finales de los años setenta la NASA recortó casi toda la financiación dedicada a la investigación de técnicas de propulsión espacial y concentró sus recursos en el transbordador. Dyson echa pestes: "Fue una estupidez absoluta y de la peor ralea". Afirma sin reparos que "dejando aparte que se perdieran siete vidas", se alegró de la destrucción del Challenger, pues creyó que eso haría que la NASA abandonara el transbordador de una vez por todas. "No está siendo tan fácil como pensé, pero creo que por fin nos libraremos de él." Dyson arguye que la mejor manera de revitalizar la NASA sería "librarla de las garras de Washington" y desmembrarla, como se hizo con la AT&T.

Durante decenios Dyson ha sido miembro de Jason, un grupo de científicos que asesoran en materia de seguridad nacional. Hace cinco años, varios miembros de Jason pasaron un día con la tripulación de un bombardero nuclear en una base del Comando Aéreo Estratégico. "Puse mi mano en el botón rojo que arma las bombas", dice. Ahora los aviones ya no están en alerta y las bombas se han guardado en almacenes. "Es un progreso enorme. Claro que la destrucción de las armas plantea todavía enormes problemas."

Dyson no ve límite alguno —cognoscitivo, espacial o temporal— al crecimiento de la inteligencia.

El sentido de la fantasía y de la aventura afloran en Dyson cuando se imagina el futuro. No está entre quienes piensan que dentro de poco los hombres serán sustituidos por robots u ordenadores. "La maquinaria biológica es en muchos sentidos más flexible que las computadoras", dice. Conjetura que un día los ingenieros genéticos serán capaces de "hacer crecer" naves espaciales "del tamaño de pollos y no mucho menos inteligentes" que, propulsadas por energía solar, explorarán el sistema solar y aun más allá. Dyson llama a estos objetos "astropollos". Sostiene que civilizaciones muy avanzadas podrían aprovechar la radiación de las estrellas mediante cubiertas que las circundasen.

En 1979 Dyson demostró cuán acendrado era su optimismo con uno de los artículos más singulares que jamás se hayan publicado en *Reviews of Modern Physics*. A Dyson le irritó una frase de Steven Weinberg en su libro *Los tres primeros minutos*: "Cuanto más comprensible parece el universo, menos se ve que tenga un sentido". Dyson replicó que ningún universo donde haya inteligencia carece de sentido. E intentó demostrar que la inteligencia podría perdurar por toda la eternidad, quizás en forma de una nube de partículas cargadas. "Por mucho que nos adentremos en el futuro,", afirmaba, "siempre pasará algo nuevo, nunca dejará de haber qué aprender, jamás se agotarán los mundos por explorar, los ámbitos en continua expansión de la vida, la consciencia y la memoria."

Se muestra "abierto" a la posibilidad de que en nuestros viajes espaciales nos encontremos con extraterrestres. Dice que lo más parecido a una inteligencia alienígena que haya visto es una mujer autista a la que conoce desde que era niña. Cuando tenía 10 años, otro niño autista le envió una carta que contenía únicamente números. Tras ojear la lista brevemente, la niña gritó: "¡Un fallo! ¡Un fallo!" Es que los números eran todos primos menos uno, el fallo. "Aunque pertenece a un mundo del todo diferente, puede compartir las matemáticas con nosotros", explica Dyson. "Quizás algo parecido ocurra con los alienígenas."

El Instituto de Estudios Avanzados planea conmemorar la primavera que viene la jubilación oficial de su miembro más veterano. Puede que Dyson no esté del todo contento por haber permanecido allí tanto tiempo. Cuando le apostillo que el Instituto es la torre de marfil por antonomasia, asiente con solemnidad. "Intento salir tantas veces como puedo para no olvidarme de que existe un mundo real", dice.

Le gusta hablar a los estudiantes. Prefiere a los de licenciatura, porque "los de doctorado están muy concentrados en problemas poco importantes, y no parece que su vida sea muy divertida". Prefiere las universidades pequeñas, en lugares apartados.

¡Qué maravillas encuentra, parece pensar, quien se atreve a ir contra corriente!

Ciencia y sociedad

Fauna española

Gato montés

Nuestro gato montés, el de la España seca, *Felis silvestris tartessia*, no sólo es un felino de porte gallardo y extraordinaria belleza. Al haber conservado las características del precursor de todos los gatos, el gran gato salvaje del Pleistoceno que vivía en las riberas del Mediterráneo hará 20.000 años, constituye una especie única en el reino animal.

En el estable ambiente de la meseta ibérica y los montes que la rodean, protegido por la Corriente del Golfo de los avatares climáticos que afectaron a otros territorios europeos y africanos, el gato montés ibérico ha guardado muchos secretos biológicos y evolutivos que ahora empezamos a desentrañar.

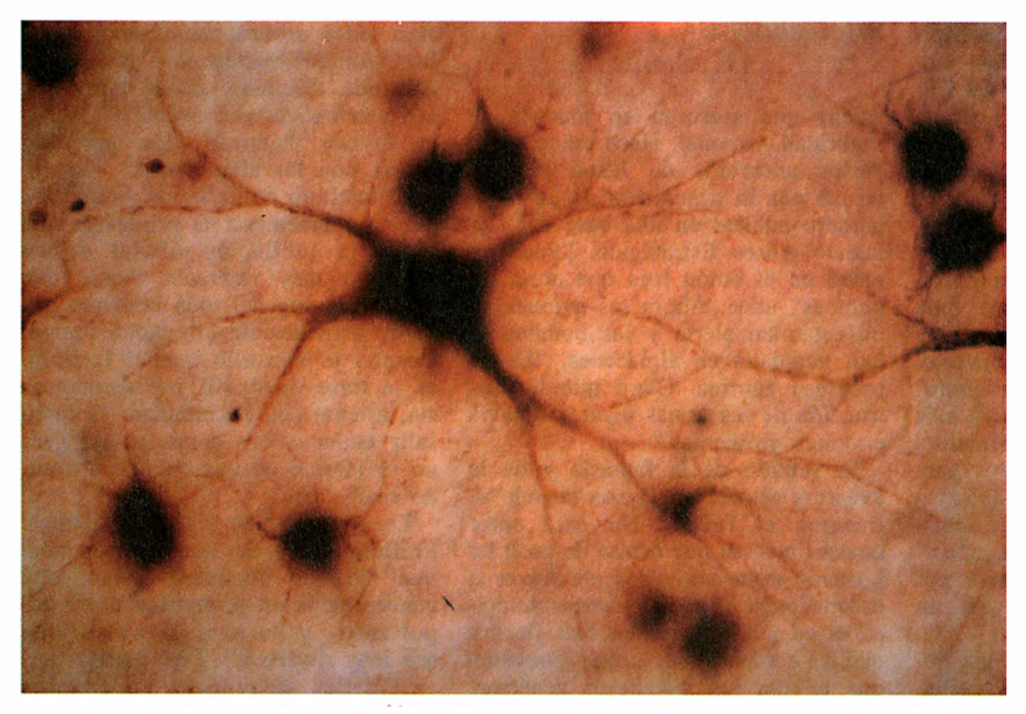
En un estudio realizado por nosotros en colaboración con Robert Williams, de la Universidad de Tennessee, hemos comparado varios componentes de las vías visuales del gato montés y del doméstico. Gracias a ese cotejo sabemos que la retina del gato montés contiene gran cantidad de "conos", células especializadas en transformar la luz en corriente nerviosa durante el día. Contiene también "bastones", que realizan la misma función durante la noche. Lo curioso es que contiene menos bastones que la retina de su descendiente, el gato doméstico. Este hecho sugiere que el gato montés está bien dotado para desenvolverse bajo la brillante luz solar de nuestra meseta. Por el contrario, el gato doméstico parece haberse adaptado mejor a la vida nocturna.

Los gatos domésticos proceden de los pequeños gatos salvajes del norte de Africa, descendientes a su vez de aquel gran gato salvaje del Pleistoceno. Hará unos 4000 años, los gatos salvajes africanos se acercaron a los graneros de los egipcios y empezaron a cohabitar con el hombre. Se veían, seguramente, obligados a buscarse la vida, a cazar animalillos que acudían al grano, cuando los hombres descansaban; durante la noche, pues. No cuesta imaginar que por el día corrían el riesgo de verse sorprendidos por lluvias de piedras u otros regalos semejantes. Y en esas circunstancias, su retina se adaptó a funcionar particularmente bien en la penumbra.

Los gatos monteses y los gatos domésticos forman una pareja biológica muy especial: son dos especies vivas de las que una puede considerarse antepasada de la otra. El gato montés ibérico es un verdadero "fósil vivo". Sus mandíbulas y dientes tienen las mismas características que los restos fósiles de los grandes gatos salvajes del final del Pleistoceno. El gato doméstico, en cambio, es el resultado de 20.000 años de evolución biológica. Por eso, la comparación de los gatos monteses con los gatos domésticos puede enseñarnos muchas cosas sobre la evolución de las especies.

Los estudiosos de la evolución han de recurrir, por lo común, a la comparación de los restos óseos de especies diversas para fundamentar sus hipótesis. Pero los gatos monteses y los domésticos *viven* hoy. Podemos comparar sus órganos vivos, y no sólo restos de partes duras, para escudriñar qué ha ocurrido a lo largo de unos cuantos miles de años, que en términos evolutivos es un tiempo muy corto. Sus cerebros, por ejemplo, encierran un tesoro de datos científicos. ¿Es posible que el cerebro evolucione en sólo 20.000 años? El estudio de los gatos monteses nos ha revelado que sí, al contrario de lo que estábamos acostumbrados a pensar; en otras especies de mamíferos, la humana entre ellas, la evolución del cerebro ha llevado incluso millones de años.

El cerebro del gato montés es mayor que el del doméstico. Las dimensiones exteriores de sus cráneos, en cambio, son semejantes. Lo que le ocurrió al gato doméstico es que, a la par que su cerebro se empequeñecía, el cráneo



Célula ganglionar "alfa" de la retina de un gato montés. El cuerpo neuronal es de gran tamaño y de él parten varias dendritas que enseguida se subdividen en múltiples ramas. La célula "alfa" está rodeada de otras células ganglionares de menor tamaño, que se clasifican en los grupos "beta" y "gamma"



Uno de los gatos que estudiamos, en los jardines de nuestra facultad de la Universidad Autónoma de Madrid

se le hacía más grueso. Y perdió neuronas. Sus células nerviosas son semejantes en cuanto a forma a las del gato montés y tienen el mismo tamaño.

Pero el gato doméstico no ha perdido las neuronas por igual. Aunque su retina, por ejemplo, tiene el mismo tamaño que la del gato montés y alberga menos neuronas en conjunto, ha conservado el mismo número de un tipo especial, las llamadas "células ganglionares alfa". Estas células están especializadas en la detección de estímulos visuales en movimiento. ¿Será que el gato doméstico ha necesitado conservar la capacidad de ver con precisión pajarillos o ratones, que no son presas precisamente estáticas?

Hay otras estructuras del sistema visual de los gatos domésticos que también contienen menos neuronas que las de su predecesor. Por ejemplo, el núcleo geniculado lateral, que es una estación por la que han de pasar los estímulos visuales en su camino desde la retina hasta la corteza cerebral, tiene un número de neuronas de hasta un 50 por ciento menos que el contenido en el del gato montés. Ante estas llamativas variaciones en el número de células de los cerebros de una y otra especie, hay que preguntarse por los mecanismos biológicos responsables.

La muerte neuronal durante el desarrollo, eficaz herramienta para "esculpir" el cerebro y dotarlo del número de neuronas adecuado para un correcto funcionamiento en la vida adulta, podría ser uno de esos mecanismos. Se sabe que muchas especies animales, incluidos los gatos y la propia especie humana, generan durante la primera mitad de la gestación un número de neuronas excesivo. Una gran cantidad de ellas muere en la segunda mitad de la gestación y poco después del nacimiento. El gato doméstico es un caso paradigmático de este fenómeno. En algunas partes de su cerebro mueren hasta 7 de cada 10 células nacidas. De acuerdo con los datos que poseemos, el número de neuronas generadas durante el desarrollo de gatos monteses y domésticos es muy similar. Lo que parece ocurrir, por tanto, es que, partiendo de un número inicial de neuronas semejante, los fetos de los gatos domésticos pierden muchas más que los gatos monteses, de manera que al llegar a adultos tienen un menor número de ellas que éstos.

Todo conduce a la hipótesis de que la superproducción de neuronas durante el desarrollo quizá constituya un acervo o reservorio filogenético que permitiría a las especies adaptarse en procesos evolutivos cortos (miles de años) mediante la regulación del número de las que mueren. Pero esta hipótesis aún precisa que muchos más datos la confirmen (o la refuten). Los cerebros de los gatos monteses encierran respuestas a estos y otros muchos enigmas. ¿Hasta qué punto sus sistemas olfatorio y auditivo son diferentes de los de sus descendientes? ¿Qué parte del cerebro guarda el secreto de su agresividad? O dicho de otra manera, ¿qué modificaciones cerebrales han llevado al gato doméstico a tornarse dócil y hacer las delicias de sus amos?

El deseo de dar respuesta a estas preguntas va unido a un profundo respeto por estos hermosos felinos que, en la brillante soledad de las tierras ibéricas, han custodiado durante miles de años un grandioso caudal de riqueza biológica y evolutiva, y cuya conservación a todos nos incumbe ahora. (Carmen Cavada y Fernando Reinoso Suárez, de la Universidad Autónoma de Madrid.)

CDC

Un superordenador respalda la teoría de los quarks

Hace poco, un superordenador concluyó en el Centro de Investigación Thomas J. Watson de la compañía IBM unos cálculos farragosísimos. Los había emprendido haría un año; no se había detenido desde entonces. No ha servido tan larga tarea sólo para ejercitar la paciencia: puede que haya proporcionado a la cromodinámica cuántica (CDC) la más firme confirmación que una teoría de partículas elementales haya recibido jamás. En concreto, el equipo de IBM ha calculado las masas de ocho hadrones —la de los hadrones es la familia de partículas elementales que incluye al neutrón y al protón—, y ha demostrado que los valores obtenidos concuerdan con las masas medidas en el laboratorio.

La CDC nació en los años setenta. Describe la constitución de los hadrones por las partículas elementales llamadas quarks. Dos quarks "arriba" y un quark "abajo", por ejemplo, forman un protón. Un campo denominado cromoeléctrico (asociado a una propiedad de los quarks que recibe el nombre de color) mantiene unidos a los quarks; a las partículas que transmiten el campo cromoeléctrico se las denomina gluones. La CDC tuvo mucho éxito al establecer las propiedades que los hadrones exhibirían en ciertas clases de experimentos, y se convirtió en parte del modelo estándar, la teoría que unifica todas las fuerzas de la naturaleza con excepción de la gravedad.

Aunque los experimentos suministran los datos de los hadrones —la masa del protón se encuentra en cualquier libro de referencia—, una teoría correcta debe ser capaz de predecir qué valores en concreto serán los obtenidos. La deducción de los valores observados mediante métodos analíticos consolidaría el modelo. No sólo ratificaría las ideas teóricas; daría a entender además que cabe calcular fidedignamente los parámetros cuánticos que no pueden detectarse experimentalmente. "Nos gustaría obtener las masas de los hadrones con una precisión muy grande; podríamos entonces emplear me-

jor la CDC", dice Douglas Toussaint, de la Universidad de Arizona, "y calcular propiedades que servirían para obtener el valor de constantes fundamentales, las masas de los quarks, por ejemplo".

Pero la complejidad matemática de la teoría ha hecho que las predicciones de ese estilo sean casi imposibles. La teoría de perturbaciones, la principal herramienta de la física de los campos cuánticos, no es apropiada para una descripción completa de la CDC; sólo cabe aplicarla a una parte limitada del modelo. Los cálculos se realizan, con ordenadores, por medio de métodos numéricos basados en la teoría de aforo en una red, marco matemático elaborado hará veinte años por Kenneth G. Wilson. La palabra "red" remite a la representación del espacio como un retículo, en cuyas intersecciones se disponen los quarks. Las conexiones entre los puntos de la red representan a los gluones.

A fin de que las respuestas que de esa manera se deducen representen el mundo real, los investigadores deben efectuar sus cálculos de forma que la distancia entre los puntos de la red se reduzca a cero y el número de puntos de la red aumente hasta el infinito. En estos límites se deberían obtener cantidades observables. Los expertos han utilizado la CDC en una red para explicar el confinamiento de los quarks, fenómeno al que se atribuye que no se detecten quarks libres: se necesitaría una cantidad infinita de energía para aislar un quark.

Más escurridiza se ha mostrado la obtención de las masas de los hadrones. "En los cálculos hay que considerar todas las configuraciones distintas posibles de los quarks, los antiquarks y el campo cromoeléctrico en la red", dice Don Weingarten, que dirige el equipo de IBM. Para obtener resultados significativos, se requieren grandes redes, lo cual a su vez complica todavía más los cálculos —más de 100.000 billones de operaciones aritméticas—.

De ahí la necesidad de un superordenador. Weingarten y su grupo de IBM, Frank Butler, Hong Chen, Jim Sexton y Alessandro Vaccarino, utilizaron el GF-11, ordenador en paralelo a gran escala a cuyo desarrollo contribuyeron y que fue concebido desde un principio para los cálculos de la CDC. La denominación alude a la máxima velocidad de cálculo: 11 gigaflops (un flop es igual a una operación en coma flotante por segundo). Para obtener las masas de los hadrones, hicieron que el GF-11 funcionase durante más de un año a una velocidad de crucero de entre cinco y siete gigaflops. Viene a equivaler al trabajo de 200.000 ordenadores de sobremesa con procesadores 386.

¿Cuál ha sido el resultado después de un año de espera? "Estadísticamente, los valores numéricos de las masas de los hadrones que hemos obtenido guardan completa coherencia con los datos experimentales", dice Weingarten. Algunos valores discrepan de los teóricos en menos de un uno por ciento a no más de un seis por ciento. Esta incertidumbre es, en su mayor parte, consecuencia del algoritmo estadístico que se emplea en los cálculos del ordenador, y no son reflejo de la CDC. En otras palabras, la CDC parece ser la teoría correcta.

A pesar de su éxito, los cálculos de Weingarten se apoyan en una simplificación a la que a menudo se recurre para que las matemáticas del problema sean abordables. Su nombre es "método de la aproximación de valencia", y no toma en consideración un efecto que tiene lugar en los sistemas cuánticos: la creación y destrucción espontánea de partículas. Las fluctuaciones cuánticas hacen que aparezcan de repente parejas quark-antiquark que influyen de una manera u otra en el sistema. En vez de incorporar este proceso, la aproximación de valencia supone que el efecto de tales pares virtuales consiste en reducir la intensidad del campo de color existente. La aproximación compensa el decremento.

No todos creen que este enfoque sea del todo válido. "Si se deja a un lado una parte de la teoría que revista cierta importancia, no se sabrá qué efecto habría tenido si no se la hubiese excluido", mantiene Norman H. Christ, físico de la Universidad de Columbia. Christ está deduciendo los valores a partir de la teoría completa por medio del superordenador de Columbia, que se dedica también exclusivamente a los cálculos de CDC. Pero Toussaint estima que explotar la teoría completa requeriría 100 veces la potencia de cálculo de las máquinas actuales.

La aproximación no socava la confianza de Weingarten en sus resultados. "La coincidencia entre la aproximación de valencia y los datos observacionales indica, en cierto sentido, que la teoría completa concuerda con los experimentos", afirma.

Pero sí coinciden todos en que estos cálculos avalan que el empleo de ordenadores en una demostración es legítimo. "Hemos llevado a cabo un verdadero cambio cualitativo", medita Weingarten. La novedad estriba en que se acepte que haya incertidumbre "experimental" en el cálculo mismo de las consecuencias observables de una teoría física fundamental. "No es", dice, "sino física teórica experimental".

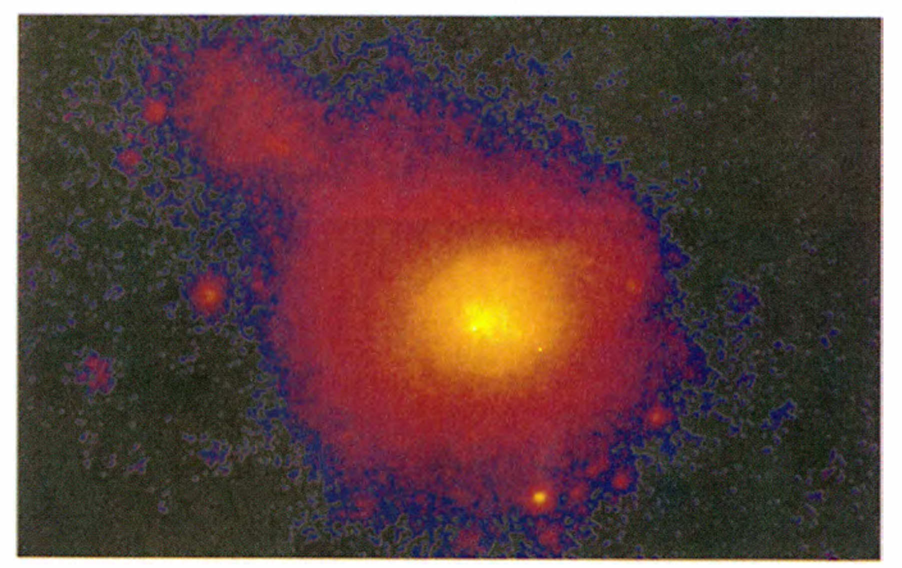


El calculador de los quarks, Don Weingarten, posa con el superordenador que él y sus colaboradores de IBM han empleado para calcular las masas de las partículas subnucleares, y con el que han confirmado que la cromodinámica cuántica es correcta

Diagnóstico cósmico

Cúmulos de galaxias

No sólo para los médicos son los rayos X un medio inapreciable con el que descubrir estructuras ocultas. El año pasado Trevor Pon-



El gas emisor de rayos X refleja la distribución de masa en el cúmulo galáctico de Coma

man y sus colaboradores, de la Universidad de Birmingham, anunciaron que las observaciones de rayos X del gas caliente del cúmulo de galaxias de Coma indican que la distribución de la masa del cúmulo es sorprendentemente complicada, como una aglomeración de bultos. "Lo que apoya que los cúmulos han crecido gracias a la agregación de grupos de galaxias, y que el proceso aún está ocurriendo", dice Ponman. Este descubrimiento es de especial interés, ya que el cúmulo de Coma, situado a una distancia de 300 millones de años luz, en la constelación Coma Berenices, es el más cercano de los cúmulos abundantes en galaxias y uno de los mejor estudiados.

Desde entonces, Simon D. M. White, del Instituto de Astronomía de la Universidad de Cambridge, y sus colaboradores han llevado más allá los descubrimientos de Ponman. Con datos del Roentgen Satellite (ROSAT), el grupo de White ha logrado una imagen de rayos X del cúmulo de Coma con un detalle sin precedentes. White describe su trabajo como "arqueología de rayos X", ya que le permite reconstruir el proceso por el que se formó el cúmulo de Coma. "Se ven claramente los remanentes de subagregados anteriores", dice White. Las extensiones del cúmulo de la figura adjunta, visibles en la parte inferior derecha, son gas caliente que envuelve galaxias gigantes; éstas fueron alguna vez, probablemente, los objetos dominantes de sus propios cúmulos, más pequeños, antes de que se fundiesen con el cúmulo de Coma.

La estructura observada de éste casa con las ideas dominantes relativas al origen de la estructura cósmica, según las cuales los vastos cúmulos de galaxias se formaron por la captura y absorción de masas más pequeñas. Los modelos alternativos, donde los cúmulos similares al de Coma se originan de golpe, cada vez parecen menos atractivos a la vista de los datos actuales, observa Simon White.

De todas formas, no todo es felicidad para los teóricos. Las observaciones de rayos X de cúmulos galácticos permiten calcular su masa total y determinar en qué proporción están compuestos de materia ordinaria ("materia bariónica"); el resto tiene que ser de la misteriosa materia oscura. White ha hallado que, en las partes más internas del cúmulo de Coma, del 11 al 35 por ciento de la masa es materia ordinaria. Los modelos cosmológicos más aceptados predicen que la fracción de materia ordinaria tiene que ser mucho más pequeña, "aproximadamente en un factor cinco", afirma. "En mi opinión, se trata de una discordancia importante."

Entonces, ¿dónde se esconde toda la materia oscura? Un grupo encabezado por John S. Mulchaey, del Instituto Científico del Telescopio Espacial, de Baltimore, a partir de otros datos del ROSAT, sostiene que podría estar encerrada en cúmulos mucho más pequeños que el de Coma, lo que, para Ponman, es un poco "escurrir el bulto". White señala que el fallo podría estar en los datos de rayos X o, si no, en que sean incorrectas nuestras ideas acerca de cómo se formaron los cúmulos de galaxias, cuán denso es el universo, o, incluso, acerca de cómo nació éste.

El origen del petróleo

Formación de roca madre

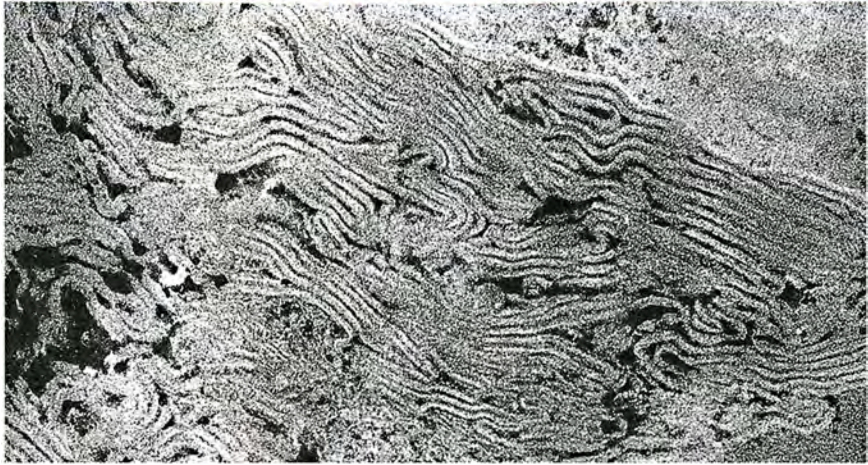
En 1988, químicos de la Escuela Nacional Superior de Química de París y microscopistas de la Escuela Normal Superior de la capital gala descubrieron, gracias al microscopio electrónico de transmisión, una gran cantidad de estructuras muy delgadas y laminares en la materia orgánica de diversos esquistos bituminosos y roca madre. Estas "ultralaminae" se parecían a las finas paredes externas de las microalgas verdes, en especial las del género *Scenedesmus*. Se observó que estas paredes se componen de macromoléculas resistentes a los ataques químicos; surgió entonces la pregunta de si la roca madre petrolífera no se produciría, al menos en ciertos casos, por acumulación de macromoléculas biológicas conservadas a pesar de cientos de millones de años de enterramiento.

Esta hipótesis se oponía al mecanismo admitido clásicamente de degradación-recondensación: la materia orgánica habría sufrido ataques bacterianos y químicos en las capas superiores de los sedimentos, de manera que las macromoléculas biológicas se habrían despolimerizado y después degradado; sólo una pequeña porción habría escapado a la destrucción debido a reacciones de recondensación que habrían ido constituyendo, al azar, geomacromoléculas complejas cada vez menos solubles; éstas, a su vez, habrían formado el querógeno (la parte orgánica de las rocas, transformada progresivamente en petróleo a lo largo del enterramiento) de la roca madre y los esquistos.

Para comprobar su hipótesis de la "conservación selectiva", C. Largeau y sus colegas han comparado las estructuras químicas de las ultraláminas fósiles y de las paredes delgadas externas de microalgas modernas. Como los compuestos presentes en estas dos estructuras tienen una gran estabilidad química, las han estudiado por pirólisis, es decir, mediante la degradación térmica por calentamiento en ausencia de oxígeno.

El análisis de los productos de pirólisis de las paredes delgadas de *Scenedesmus quadricauda* y otras microalgas actuales ha revelado, en primer lugar, una red compuesta de largas cadenas hidrocarbonadas (encadenamiento de grupos CH_2). Al igual que los productos de pirólisis de la roca madre y de los esquistos que contienen ultraláminas, las macromoléculas resistentes de las algas tenían la particularidad de liberar, en





Paredes celulares aisladas de microalgas Scenedesmus armatus (arriba) *y ultraláminas de un querógeno del Cretácico Superior de Omán* (abajo)*: los análisis químicos han confirmado el parecido que guardan estas dos estructuras, observadas con el microscopio electrónico de transmisión*

el momento de su pìrólisis, N-alquilnitrilos (moléculas orgánicas lineales terminadas por el grupo –C ≡ N): esta semejanza química confirma que las ultraláminas fósiles provienen de la conservación de paredes externas de algas *Scenedesmus* u otras microalgas de morfología análoga.

¿Por qué las macromoléculas de las delgadas paredes externas de las microalgas son tan resistentes químicamente, a pesar de la fragilidad de algunos de sus enlaces (ésteres –COO– o amidas $-CONH_2$)? Porque estas funciones están protegidas por la red de largas cadenas hidrocarbonadas, que impiden que los reactivos de rotura alcancen las zonas más frágiles: las macromoléculas permanecen intactas a lo largo de su fosilización y pasan a través de los tiempos geológicos sin degradación. Por el contrario, la protección por la red es ineficaz contra las degradaciones térmicas: los nitrilos identificados en los productos de pirólisis, por ejemplo, provienen de la rotura térmica de los enlaces de amidas.

Estos trabajos, una parte de los cuales se ha efectuado en colaboración con la sociedad Elf Aquitaine, han sacado a luz una nueva familia de macromoléculas biológicas y determinado las causas de su excepcional resistencia. Y han desembocado en el descubrimiento de un nuevo mecanismo de fosilización, el de conservación de macromoléculas resistentes. El análisis en curso de otros grupos de microorganismos indica que este mecanismo es general.

Proteínas y cinc

Dedos, bucles y racimos

Tras el descubrimiento de la primera proteína con dedos de cinc, por Aaron Klug y su equipo, se han multiplicado los ejemplos de proteínas que tienen características similares a las de aquéllas. Se sabe ahora que existen al menos tres grandes grupos de proteínas con dominios estructurados que se unen específicamente al ADN y en cuya constitución desempeñan un papel esencial los átomos de cinc.

En primer lugar están las proteínas con dedos de cinc "clásicos", como la TFIIA y *Zif298.* Esas proteínas tienen numerosos dominios en forma de dedos de cinc (entre 2 y 37), cada uno de los cuales contiene dos cisteínas y dos histidinas, en combinación las cuatro con un átomo de cinc.

La segunda clase es la de los receptores nucleares de hormonas, que contienen siempre dos (y sólo dos) estructuras que forman complejos con el cinc. El primer dominio asegura la fijación específica al ADN, mientras que el segundo estabiliza la unión. En este caso son cuatro cisteínas las que se unen a un átomo de cinc.

Esos dominios están formados por dos hélices alfa: una entra en contacto con el ADN, y la otra, que se entrecruza con la primera, la obliga a mantener ese contacto. Bert Vallee, de la Universidad de Harvard, ha propuesto que los dominios de fijación al ADN de los receptores nucleares reciban el nombre de *zinc twists.* Es decir, bucles, o entrelazados, o tirabuzones, de cinc.

Por último, más recientemente se han identificado en ciertas proteínas de levaduras, como la Gal4, dominios de fijación con seis cisteínas que fijan dos átomos de cinc. Su estructura tridimensional es distinta, y se ha propuesto que este nuevo tipo de dominios de unión al ADN se denomine *zinc cluster* (grupos o racimos de cinc).

Estos tres tipos de estructuras no tienen un antecesor común; se deben a una convergencia evolutiva a escala molecular. Se puede comparar esta convergencia evolutiva con la que se da entre las alas de los pájaros y las de los murciélagos. Esas estructuras se parecen mucho, porque sin duda representan la mejor solución para que un animal pueda volar, ¡pero los murciélagos no son pájaros!

A escala molecular, es posible imaginar que la naturaleza ha encontrado un manera cómoda de fabricar dominios proteínicos capaces de unirse específicamente al ADN, en los que el cinc sirve para estabilizar la estructura tridimensional de la proteína.

Otros tipos de dominios proteínicos dotados de actividad catalítica también se estabilizan mediante combinaciones con cinc, pero no reconocen el ADN. El cinc no confiere a la molécula propiedades específicas, sino que estabiliza ciertas configuraciones. Sin duda, los diferentes dominios de unión (dedos, bucles y racimos de cinc) han adquirido de forma independiente su capacidad de reconocer el ADN.

De cerca

Fotos y texto: Satoshi Kuribayashi

El salto fusiforme del ratón

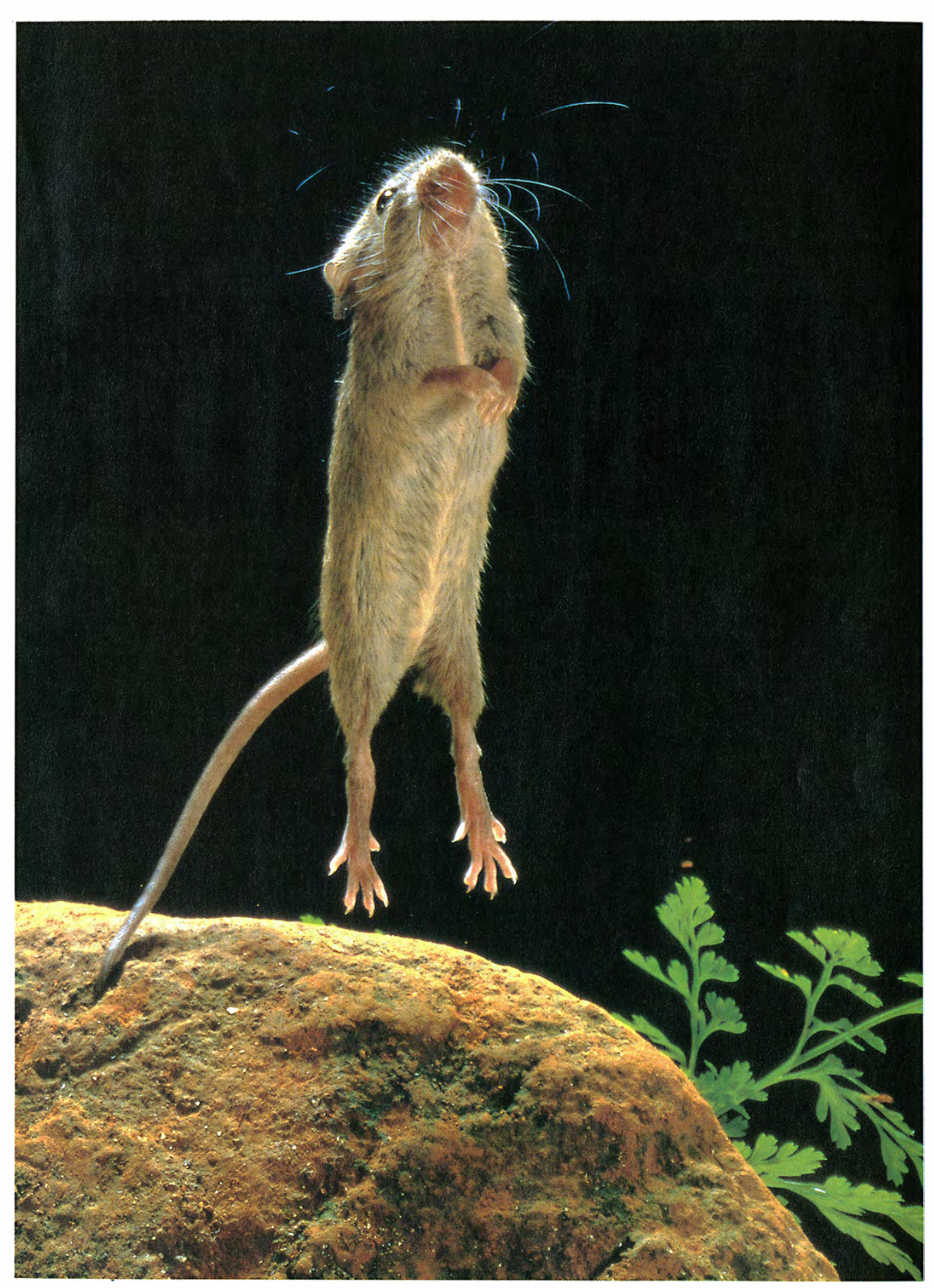


Compañero inseparable del hombre, devastador voraz de sus graneros si no lo fue antes de las raíces de sus cosechas, culpable de muchos de sus males, el roedor ha sido también modelo habitual en sus investigaciones. En su cuerpo menudo suelen comenzar los ensayos fisiológicos, las pruebas de rechazo en injertos o las alteraciones de la manipulación genética.

Poseen, en efecto, unas capacidades únicas. Por ejemplo, apenas modifican su tasa de consumo de oxígeno según suben o bajan una cuesta a la carrera. Lo que se explica porque cada gramo de tejido de un ratoncillo consume oxígeno a un ritmo 13 veces mayor que la tasa por un gramo de un caballo mediano. Andaba cavilando sobre esas propiedades biomecánicas y sus hábiles adaptaciones a medios hostiles (desde el desierto hasta los picos montañosos) cuando se me plantó una fierecilla de menos de 10 centímetros de la cruz al sacro. Pegó un salto y desapareció.

Preparé la máquina y el escenario adecuado. Quería ver detenidamente aquel salto impecable. Lo que no fue fácil, pues no se mostraba a gusto con los disparos automáticos del sensor de infrarrojos. Pero valió la pena para poder disfrutar de ese brinco de 30 centímetros, de la roca a una tablilla. Fija la mirada, distiende los dedos de las patas traseras y se lanza en perfecto huso hacia el señuelo.

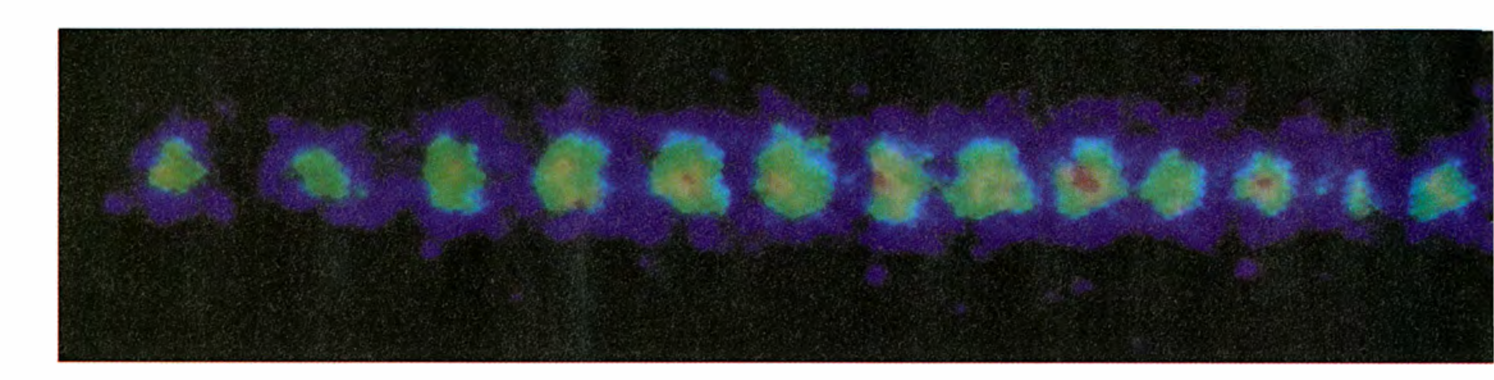
Foto de la derecha
distancia focal: 105 mm
diafragma: F = 32
exposición: 1/30.000 de segundo
película: ISO = 100



La medición exacta del tiempo

Relojes cada vez más exactos —que no varían en más de un segundo en millones de años— permiten contrastaciones muy refinadas de la relatividad y mejores sistemas de navegación

Wayne M. Itano y Norman F. Ramsey



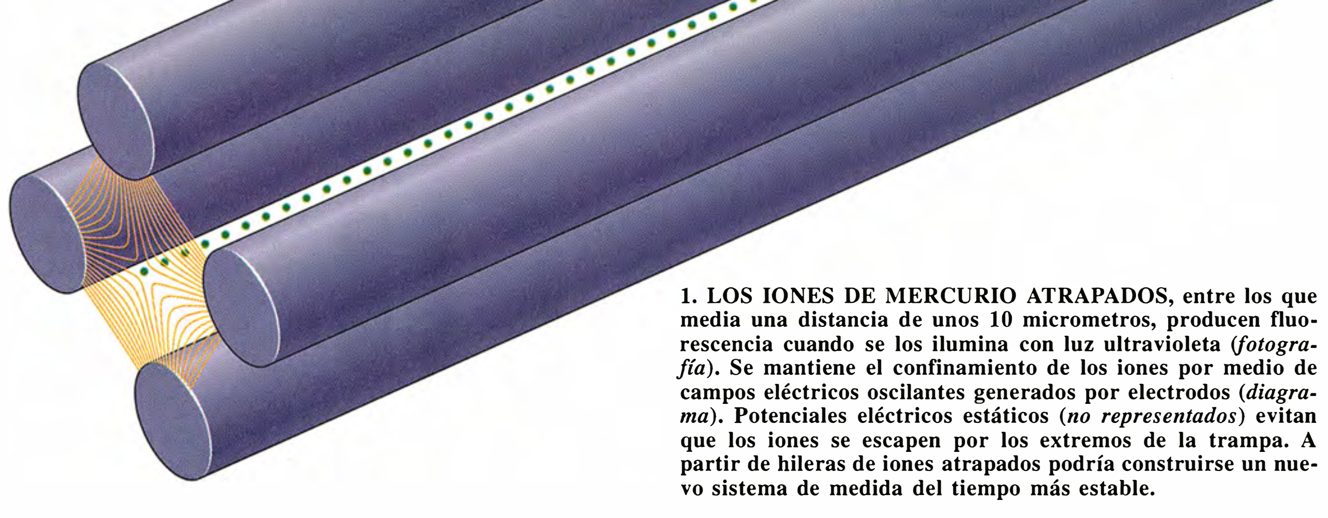
Poca gente se queja de la exactitud de los relojes actuales. Los de cristal de cuarzo más corrientes sólo ganan o pierden alrededor de un segundo por semana, cantidad insignificante en la experiencia cotidiana. Donde la exigencia es mayor —en las comunicaciones con vehículos interplanetarios, en el seguimiento de buques y aviones mediante satélites—, se recurre a relojes atómicos que en un millón de años apenas si marrarían más de un segundo. Podría pensarse que no queda mucho por mejorar en los relojes e incluso que no se necesitan otros más exactos. Sin embargo, en numerosas tareas científicas y técnicas hace falta toda la precisión que los mejores relojes puedan proporcionar e incluso más. Por ejemplo, algunos púlsares (estrellas que emiten brotes periódicos de radiación electromagnética) son en algunos aspectos más estables que los relojes actuales, lo que dificulta su estudio. La contrastación meticulosa de la relatividad y de otros conceptos físicos fundamentales requiere sistemas de medición del tiempo todavía más exactos. Es muy probable que lleguen a construirse tales relojes, pues nuevas técnicas, basadas en el confinamiento y enfriamiento de átomos e iones, justifican la confianza de que podrían llegar a ser mil veces más precisos que los actuales. Es posible que, como ya ha sucedido otras veces, los futuros instrumentos muestren que lo que ahora se considera constante e inmutable es, a escala más fina, dinámico y cambiante. Los relojes de sol, de agua y de péndulo del pasado bastaban para dividir el día en horas, minutos y segundos, pero no para detectar las variaciones de la rotación y la revolución terrestres.

WAYNE M. ITANO y NORMAN F. RAMSEY son colaboradores habituales. Itano obtuvo el doctorado en la Universidad de Harvard bajo la dirección de Ramsey; actualmente pertenece a la División de Tiempo y Frecuencia del Instituto Nacional de Patrones y Tecnología de los Estados Unidos. Ramsey, catedrático de física en Harvard, obtuvo el doctorado en la Universidad de Columbia. Obtuvo en 1988 el premio Nobel de Física por sus trabajos sobre el método del campo oscilatorio separado y el máser de hidrógeno atómico.

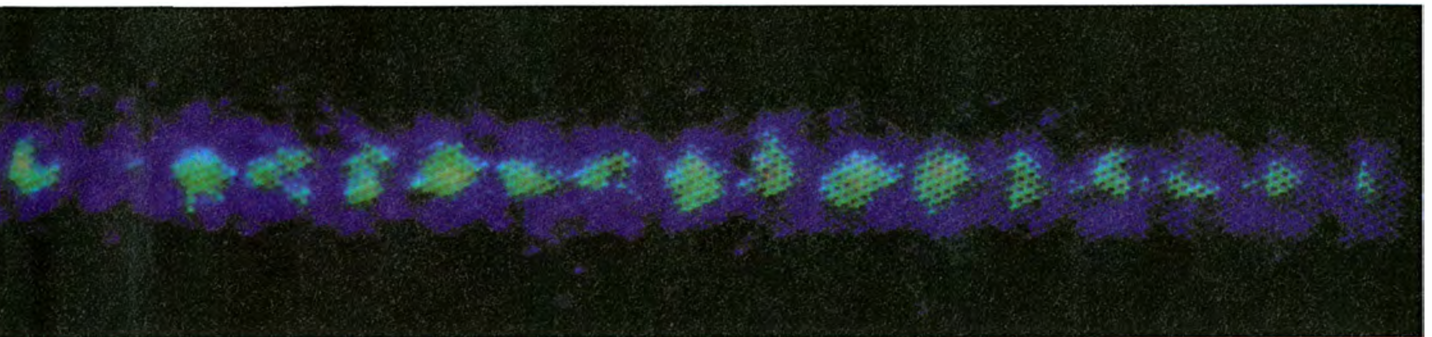
La exactitud de un reloj depende de la regularidad de alguna clase de movimiento periódico. Los viejos relojes utilizaban el movimiento de vaivén de un péndulo; su varilla se acoplaba a una pieza llamada escape, que se incrustaba en las muescas de una rueda dentada de tal manera que ésta sólo pudiese girar en un sentido; la rueda transmitía el movimiento a las manecillas del reloj, generalmente por medio de una serie de engranajes adicionales. La investigación encaminada a mejorar los relojes busca, en la mayor parte de los casos, descubrir sistemas cuyas oscilaciones sean lo más estables posible.

Las tres cualidades más importantes que un patrón de frecuencia ha de reunir son la estabilidad, la reproducibilidad y la exactitud. La estabilidad mide hasta qué punto se mantiene constante la frecuencia. Depende de la duración del intervalo observado, por lo que la variación de frecuencia de un patrón dado podría ser de una parte en 100.000 millones de un segundo al siguiente, y en cambio ser mayor, digamos, de una parte en 10.000 millones, de un año a otro. Hay reproducibilidad en la medida en que distintos aparatos atenidos a un mismo diseño proporcionen el mismo valor. La exactitud es el grado de coincidencia con que el reloj reproduce un intervalo de tiempo dado, un segundo, por ejemplo.

Hasta principios del siglo XX, los relojes más exactos se basaban en la regularidad de los movimientos pendulares. Galileo dedujo esta propiedad tras observar que el período de oscilación era aproximadamente independiente de la amplitud. En otras palabras, un péndulo completa un ciclo en más o menos el mismo tiempo sea cual sea la amplitud del vaivén. No fueron posibles en la práctica los relojes de péndulo hasta que, a mediados del siglo XVII, el holandés Christiaan Huygens inventó un escape que mantenía constante la oscilación. En los cronómetros pos-



1. LOS IONES DE MERCURIO ATRAPADOS, entre los que media una distancia de unos 10 micrometros, producen fluorescencia cuando se los ilumina con luz ultravioleta (*fotografía*). Se mantiene el confinamiento de los iones por medio de campos eléctricos oscilantes generados por electrodos (*diagrama*). Potenciales eléctricos estáticos (*no representados*) evitan que los iones se escapen por los extremos de la trampa. A partir de hileras de iones atrapados podría construirse un nuevo sistema de medida del tiempo más estable.



teriores se emplearon ruedas equilibradoras, o volantes, conectadas a muelles espirales. Estos aparatos tenían la ventaja de ser portátiles.

Mucho ingenio se puso en mejorar la precisión de los relojes de péndulo y volante. Los relojeros compensaron los cambios de temperatura combinando materiales que tenían diferentes coeficientes de dilatación térmica. En los años veinte de nuestro siglo surgió un enfoque más radical. El ingeniero británico William H. Shortt ideó un reloj en el que un "péndulo esclavo" se sincronizaba con un "péndulo libre"; éste oscilaba en un recipiente a presión reducida, y no hacía que funcionase mecanismo alguno del reloj; actuaba sólo sobre un conmutador eléctrico, que servía para mantener sincronizado el péndulo esclavo. De esta manera se conseguía que el período de los relojes de Shortt fuese sumamente estable; erraban sólo en algunos segundos por año (alrededor de una parte en 10 millones), y se los adoptó en los laboratorios como patrones de referencia.

El siguiente avance importante en la medida del tiempo se debió al desarrollo de los osciladores electrónicos de cristal de cuarzo. Su frecuencia viene determinada por el período de las vibraciones elásticas de un cristal de cuarzo tallado con esmero. Una propiedad que estos cristales poseen, la piezoelectricidad, permite que por medios electrónicos se mantengan constantes sus vibraciones. Cuando se somete el cristal a una tensión mecánica, se genera en él un potencial eléctrico; recíprocamente, la aplicación de un potencial eléctrico induce una pequeña tensión mecánica.

El cuarzo vibra con una frecuencia que depende de la forma y dimensiones del cristal. En algunos relojes de pulsera está tallado en forma de diapasón de unos pocos milímetros de longitud; en otros relojes es una lámina plana. El cuarzo se conecta a un circuito eléctrico que produce una corriente alterna. La frecuencia del circuito se acopla a la frecuencia de vibración natural del cuarzo (por lo general, 32.768 hertz) gracias a la realimentación eléctrica de éste. La corriente alterna del circuito pasa a un divisor de frecuencias, dispositivo electrónico digital que genera un impulso de salida por cada cierto número prefijado de impulsos de entrada. El divisor se encarga también de gobernar un sistema mecánico o electrónico digital de presentación del tiempo registrado.

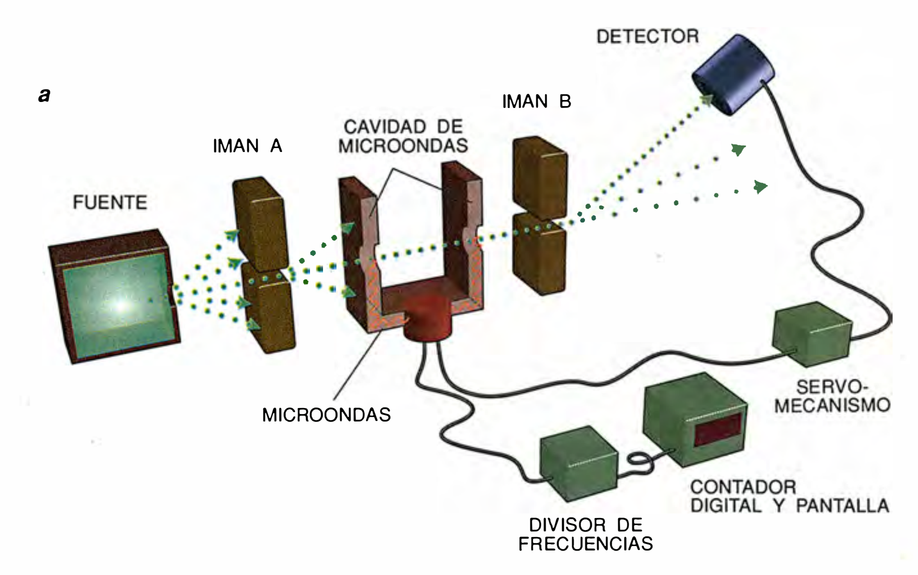
A fines de los años veinte, Joseph W. Horton y Warren A. Marrison fabricaron el primer reloj basado en un oscilador de cristal de cuarzo. En los cuarenta, los relojes de cristal de cuarzo sustituyeron a los péndulos Shortt como patrones primarios de laboratorio. Su estabilidad era de aproximadamente 0,1 milisegundos por día (alrededor de una parte en mil millones). No demasiado caros, los relojes de cuarzo siguen siendo muy usados. Los elementos de medida del tiempo de los relojes de cuarzo comunes son versiones simplificadas y miniaturizadas de los patrones de frecuencia de ese material. Las versiones de pulsera se popularizaron en cuanto se dominó la fabricación de diminutos diapasones de cuarzo y de componentes electrónicos digitales de bajo consumo y tamaño.

Pero los relojes de cuarzo no sirven para ciertas tareas científicas. Según los cálculos de Einstein, la gravedad deforma tanto el espacio como el tiempo. La diferencia de potencial gravitatorio hace que el tiempo transcurra más deprisa a gran altura, en la atmósfera, que en la superficie de la Tierra. La variación es pequeña. El tiempo transcurre unas 30 millonésimas de segundo más rápidamente en la cima del Monte Everest que al nivel del mar. Sólo los patrones atómicos de frecuencia tienen la precisión que se necesita para detectar este efecto.

Dichos patrones se cimientan físicamente en la cuantización de los niveles de energía de los átomos y las moléculas. Las leyes de la mecánica cuántica dictan que las energías de un sistema ligado —un átomo lo es— no toman sino ciertos valores discretos. Un campo electromagnético puede hacer que un átomo suba de un nivel de energía a otro. El proceso también opera en sentido inverso: si el átomo está en un nivel

de energía alto, puede caer a un nivel más bajo y emitir al hacerlo energía electromagnética.

La máxima cantidad de energía se absorbe o se emite en una frecuencia dada, la de resonancia, igual a la diferencia de energía entre los dos niveles de la transición dividida por la constante de Planck. Este valor se llama a veces frecuencia de Bohr. Gracias a su extrema estabilidad, estas frecuencias son patrones de tiempo ideales. El tiempo se mide a partir de las frecuencias a las que se emite o absorbe la energía electromagnética. En esencia, el átomo hace las veces de péndulo maestro cuyo número de oscilaciones marca el paso del tiempo.



2. LOS PATRONES DE FRECUENCIA DE HAZ ATOMICO proporcionan el mecanismo más exacto para la medida del tiempo a largo plazo. Los relojes atómicos corrientes se basan en imanes (*a*). Los átomos que están en el nivel de energía adecuado son desviados por el imán A de manera que entren en la cavidad de microondas. Los campos de microondas, que oscilan a la frecuencia de resonancia de los átomos, llevan a algunos de ellos a un segundo nivel de energía; el imán B los desvía y los hace incidir en un detector. El servomecanismo recoge los datos del detector y, con esa información, actúa sobre la frecuencia de las microondas, a

Aunque hemos descrito propiedades cuánticas generales, los fenómenos físicos en que realmente se basan los relojes atómicos son un poco más complicados. En la mayor parte de los relojes atómicos, la energía que los átomos absorben o desprenden corresponde a transiciones entre los llamados niveles hiperfinos de energía. Estos niveles existen a causa de una propiedad intrínseca de las partículas, el momento magnético. Los electrones y los núcleos de casi todos los átomos giran alrededor de sus ejes como si fueran trompos. Además, están imanados, como si se tratase de agujas de brújula orientadas a lo largo de sus ejes de rotación. Estos, a su vez, se orientan entre sí de diferentes maneras, a cada una de las cuales le corresponde una energía distinta; de ahí la existencia de los niveles hiperfinos. Este nombre proviene de que fueron observados por primera vez gracias a los pequeños desdoblamientos de las líneas espectrales que producen.

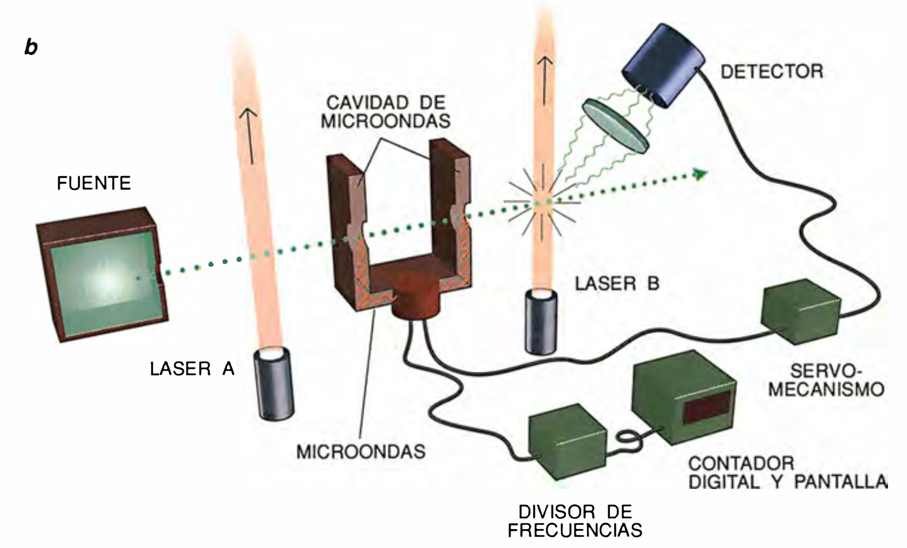
Sobre el papel, los patrones basados en procesos atómicos son ideales. En la práctica, la perfección es difícil de alcanzar. Los átomos no absorben o emiten energía justo a la frecuencia de resonancia. Parte de la energía se dispersa en un pequeño intervalo alrededor de dicha frecuencia, a modo de un difuminado de frecuencias, por así decirlo. A igualdad de los demás factores, la precisión con que puede medirse la frecuencia de resonancia es inversamente proporcional a ese emborronamiento. Cuanto mayor sea su anchura, tanto menos precisa será la medida. La dispersión se suele expresar mediante el factor de calidad, o Q, que es igual al cociente de la frecuencia de resonancia por la dispersión. En muchos casos, cuanto mayor sea la frecuencia de resonancia, tanto mayor será Q. Además, el emborronamiento suele ser inversamente proporcional al tiempo que el átomo esté en el aparato. En tales casos, el factor Q de la resonancia, y por tanto la precisión de la medida, aumenta cuando el tiempo de medición aumenta.

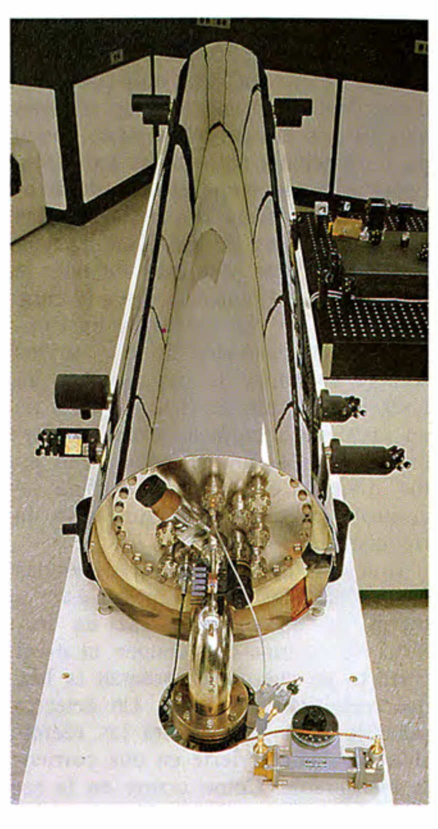
A causa del efecto Doppler, los movimientos de los átomos hacen que las frecuencias de resonancia medidas estén desplazadas de sus valores reales, lo que añade más incertidumbre. Si los átomos se mueven a velocidades muy inferiores a la de la luz, cabe descomponer el efecto en contribuciones de primer y de segundo orden. El corrimiento Doppler de primer orden es la variación aparente de la frecuencia de la onda electromagnética aplicada que se "observa" desde un átomo que se mueve. La cuantía del corrimiento es proporcional a la velocidad del átomo. Si éste se mueve en la misma dirección y sentido que la onda, la frecuencia se desplazará hacia una frecuencia menor; si se mueve en sentido opuesto, la frecuencia aumentará; si las direcciones son perpendiculares, el corrimiento de primer orden será nulo.

El efecto de segundo orden se debe a la dilatación del tiempo. Según la teoría de la relatividad, el tiempo transcurre más lentamente para los objetos en movimiento; un átomo en movimiento "observa" una frecuencia ligeramente diferente de la registrada por un átomo estacionario. Su influencia sobre la frecuencia de resonancia es, en general, mucho menor que el corrimiento de primer orden. El desplazamiento de segundo orden es proporcional al cuadrado de la velocidad del átomo y no depende de las direcciones relativas de movimiento del átomo y de la onda electromagnética.

Otros factores afectan a la calidad de la información: los átomos del sistema chocan entre sí, y sus impactos añaden ruido a la señal; el entorno perturba las frecuencias de resonancia; los fallos del equipo electrónico, la presencia de campos electromagnéticos parásitos y la ubicua radiación térmica producen más y más errores. Por tanto, un buen patrón de frecuencia atómico no solamente debe establecer una señal fija y periódica; ha de minimizar también esos errores potenciales.

La resonancia de haz magnético, hoy tan utilizada, fue uno de los primeros métodos a los que se recurrió para superar muchas de esas dificultades; I. I. Rabi y sus colegas, allá por los años treinta, fueron los pioneros de su uso. Los átomos salen de una pequeña cámara por una estrecha apertura y se propagan después en forma de haz. Se puede blindar todo el instrumento contra los campos eléctricos y magnéticos parásitos, y aislarlo de las fuentes externas de calor. Aún es, quizá, más importante la eliminación de los choques entre los átomos que se logra al alojar el instrumento entero en una larga cámara donde se ha hecho el vacío; es tan baja en ella la pre-





fin de que coincida con la de resonancia. Los patrones de bombeo óptico (*b*) emplean luz en lugar de imanes para seleccionar los átomos. El láser A "bombea" los átomos al nivel correcto de energía, para que puedan ser excitados a continuación por las microondas. Sólo los átomos que las microondas sitúan en el nivel correcto de energía absorben la luz del láser B, que reemiten rápidamente; un fotodetector capta los fotones correspondientes. Actualmente el patrón de tiempo de los EE.UU. es un reloj de bombeo óptico que usa átomos de cesio y recibe el nombre de NIST-7 (*fotografía*).

sión, que es muy improbable que los átomos choquen con algo antes de llegar al otro extremo.

En forma simplificada, la resonancia de haz atómico consta de tres pasos. El primero consiste en seleccionar aquellos átomos cuyo nivel de energía sea el apropiado; para ello se aplica un campo magnético que posea una determinada configuración y que hará las veces de filtro, de la siguiente forma: desviará el haz de manera que sólo los átomos cuyo nivel de energía sea el elegido pasen por la abertura que sirve de entrada a la cavidad.

El segundo paso, que es esencial, consiste en excitar los átomos ya seleccionados a un nivel de energía más alto. Se hace que los átomos atraviesen un campo oscilante de microondas aplicado en una cavidad. Los átomos saltarán a otro nivel de energía solamente si la frecuencia del campo coincide con la frecuencia de Bohr.

En el tercer paso se detecta qué átomos han cambiado de nivel de energía. El haz de átomos pasa a través de otro filtro de campo magnético; esta vez sólo se permitirá que los átomos cuyo nivel de energía sea el correcto incidan en un detector, que registra los átomos en forma de corriente. Si la frecuencia de las microondas oscilantes coincide con la frecuencia natural de los átomos, muchos de éstos llegarán al aparato. Si, en cambio, la frecuencia del campo de microondas aplicado no está bien ajustada, habrá menos átomos que cambien sus niveles de energía y menos, en consecuencia, que incidan en el detector. Que el número de los que sí lo hacen sea máximo querrá decir, pues, que las microondas tienen la frecuencia natural de los átomos. Un mecanismo de realimentación electrónica, el servobucle, mantiene ese número constante. Si la corriente del detector disminuye, el mecanismo alterará la frecuencia del campo aplicado hasta que la corriente alcance de nuevo un máximo.

De esa forma, el servobucle mantiene la frecuencia del campo de microondas igual a la frecuencia natural de los átomos. Para medir el tiempo, se acopla el campo a un divisor de frecuencia; los impulsos que éste genera marcarán su transcurso. Los átomos son a este tipo de reloj lo que el cristal de cuarzo es a un reloj corriente o el péndulo maestro a un reloj de Shortt; el campo de microondas aplicado desempeña el papel del circuito oscilante o del péndulo esclavo, los dispositivos que gobiernan la presentación de los datos.

Una variante reseñable de la técnica del haz atómico se produjo en 1949. Uno de nosotros (Ramsey) inventó ese año el método del campo oscilatorio separado. En esta técnica, en lugar de irradiar los átomos con un único campo se disponen a lo largo de la trayectoria del haz dos campos, separados por cierta distancia. La aplicación en dos etapas del campo oscilante tiene muchas ventajas; entre ellas figuran el estrechamiento de la resonancia y la eliminación del corrimiento Doppler de primer orden. Jerrold R. Zacharias y John V. L. Parry adaptaron este método a la construcción de patrones de frecuencia prácticos a mediados de los años cincuenta.

En la actualidad, el método del campo oscilante separado proporciona los relojes más reproducibles. Los mejores están instalados en unos cuantos laboratorios nacionales, pero hay en el mercado versiones más pequeñas y menos exactas. Se emplea el cesio, que es preferible a otros elementos en varios aspectos. Su frecuencia de resonancia es relativamente alta —unos 9192 megahertz— y pequeña la correspondiente anchura, por lo que su Q es excelente. El cesio se detecta de manera fácil y eficaz; no se necesita más que un filamento metálico incandescente. Cuando un átomo de cesio choca contra el filamento, se ioniza y se hace observable en forma de corriente eléctrica.

El factor Q de estos patrones vale alrededor de 100 millones; excede al de los relojes de pulsera de cuarzo en un factor de varios miles. Las mejores reproducibilidades son de aproximadamente una parte en 10^{14}. Los mejores patrones de frecuencia de cesio son en esto tan superiores a las velocidades de rotación y revolución de la Tierra, que en 1967 se definió el segundo como 9.192.631.770 pe-

ríodos de la frecuencia de resonancia del átomo de cesio 133.

Una de las mejoras más prometedoras de los patrones de haz atómico de cesio es el uso del bombeo óptico para seleccionar los estados atómicos. Estas técnicas empezaron a desarrollarse en los años cincuenta, gracias a Francis Bitter, Alfred Kastler, Jean Brossel y otros. En este método la selección de átomos se lleva a cabo con luz, y no por medio de un campo magnético. Antes de que se los someta al campo de microondas, un láser lleva ("bombea") los átomos de un nivel de energía a otro; el número de átomos que se encuentran en los diversos niveles de energía se controla precisamente ajustando la frecuencia de la luz.

Una vez que el campo de ondas ha irradiado los átomos, pasan éstos a través de un segundo haz de luz. Sólo los átomos que ocupen el nivel correcto de energía absorberán la luz, que reemitirán enseguida. Un detector sensible a la luz registra las reemisiones y las convierte en una corriente mensurable. Como ocurre en la resonancia de haz atómico con selección magnética, la corriente del detector será máxima cuando el campo de microondas aplicado coincida con la frecuencia natural de los átomos.

El empleo de luz en lugar de imanes tiene muchas ventajas. Quizá la más decisiva sea que con técnicas adecuadas de bombeo óptico cabe llevar todos los átomos del haz al nivel de energía deseado. La selección magnética, en cambio, se limita a retirar los que estén en otros niveles de energía. Por esta razón la intensidad de la señal es mucho mayor en el sistema de bombeo óptico que en el de selección magnética. En distintos laboratorios se están desarrollando relojes de haz atómico de cesio bombeados ópticamente; uno de esos relojes, el del Instituto Nacional de Patrones y Tecnología de los Estados Unidos, en Boulder, Colorado, denominado NIST-7 (NIST son las siglas en inglés del Instituto), ha sido adoptado hace poco como patrón básico de frecuencia de los Estados Unidos. Su error esperado es de un segundo en un millón de años, más o menos; su estabilidad es mucho mayor que la de su predecesor.

Hay un reloj atómico de bombeo óptico disponible comercialmente. Se basa en la resonancia hiperfina a 6835 megahertz del rubidio 87. En él no se forma con los átomos de rubidio un haz que atraviese el aparato, sino que se los mantiene en una cápsula de vidrio, que guarda también una mezcla de gases, a fin de que los átomos no choquen con las paredes del recipiente. Tampoco se emplea el láser: los átomos de la cápsula son irradiados por una lámpara de descarga rellena de vapor de rubidio. Un sensor fotovoltaico instalado en el lado opuesto de la cápsula detecta las variaciones que sufre la cantidad de luz que los átomos absorben. La preparación de los átomos, la aplicación de las microondas, la detección de la luz: todas estas operaciones se efectúan en el mismo recipiente. Gracias a ello, un reloj de rubidio cabe en un cubo de unos 10 centímetros de arista. En contraste, los relojes de haz de cesio miden como poco unos 50 centímetros, y los hay que sobrepasan los cinco metros. Los relojes de rubidio son, además, mucho más baratos que los de cesio.

El inconveniente es que los relojes de rubidio son en general menos exactos y menos reproducibles. El Q de los patrones de rubidio vale alrededor de 10 millones, una décima parte del factor de calidad de los de haz de cesio, y su reproducibilidad viene a ser de sólo una parte en 10^{10}. Que la reproducibilidad sea escasa se debe más que nada a las variaciones de la frecuencia de resonancia que causan los frecuentes choques de los átomos de rubidio con las moléculas del gas. Pero la estabilidad a corto plazo de los patrones de rubidio es buena: es, de hecho, mejor que la de algunos sistemas de haz de cesio.

Los relojes atómicos hasta ahora descritos miden el tiempo de forma muy indirecta: detectando el cambio que experimenta una señal —el número de átomos que inciden en un detector— cuando varía la frecuencia de los campos oscilantes aplicados. Mediante el principio físico del máser (acrónimo de *microwave amplification by stimulated emission of radiation*, es decir, amplificación de microondas por emisión estimulada de radiación) es posible hacer un uso más directo de las radiaciones atómicas. En 1953, Charles H. Townes y sus colaboradores inventaron el primer máser, en el que emplearon amoniaco. Ramsey, Daniel Kleppner, H. Mark Goldenberg y Robert V. C. Vessot desarrollaron a partir de 1960 un máser de hidrógeno atómico, que es el único tipo que se ha usado abundantemente como reloj atómico.

En este instrumento una descarga de radiofrecuencia descompone las moléculas de hidrógeno contenidas en un recipiente a alta presión. Los átomos resultantes emergen, formando un haz, por una pequeña abertura; mediante campos magnéticos se focalizan los que están en el nivel más alto de energía, y se los hace penetrar en una ampolla de almacenamiento, especialmente recubierta, a la que rodea una cavidad resonante sintonizada.

En la ampolla, algunos de esos átomos descienden a un nivel más bajo de energía; de esa forma se generan fotones de microondas, que estimulan la caída de otros átomos a un nivel de energía inferior, lo que a su vez produce más fotones de microondas. Se crea así en la ampolla un campo de microondas automantenido: por eso se le da al dispositivo el nombre de "máser". La cavidad sintonizada que rodea a la ampolla hace que los fotones vuelvan al sistema, para que siga el proceso de emisión estimulada. La oscilación del máser persistirá mientras no se deje de alimentar el sistema con hidrógeno.

3. EL MASER DE HIDROGENO ATOMICO sirve como patrón de frecuencia gracias a un campo de microondas automantenido. Un imán desvía los átomos de hidrógeno cuyo nivel de energía sea el correcto a una ampolla de almacenamiento. Algunos átomos caen a un nivel más bajo, y emiten un fotón de microondas, que a su vez estimula la caída de otros átomos a un nivel inferior, con la consiguiente emisión de más fotones. El proceso crea rápidamente un campo de microondas en la ampolla, que induce una corriente alterna en un conductor situado en la cavidad sintonizada.

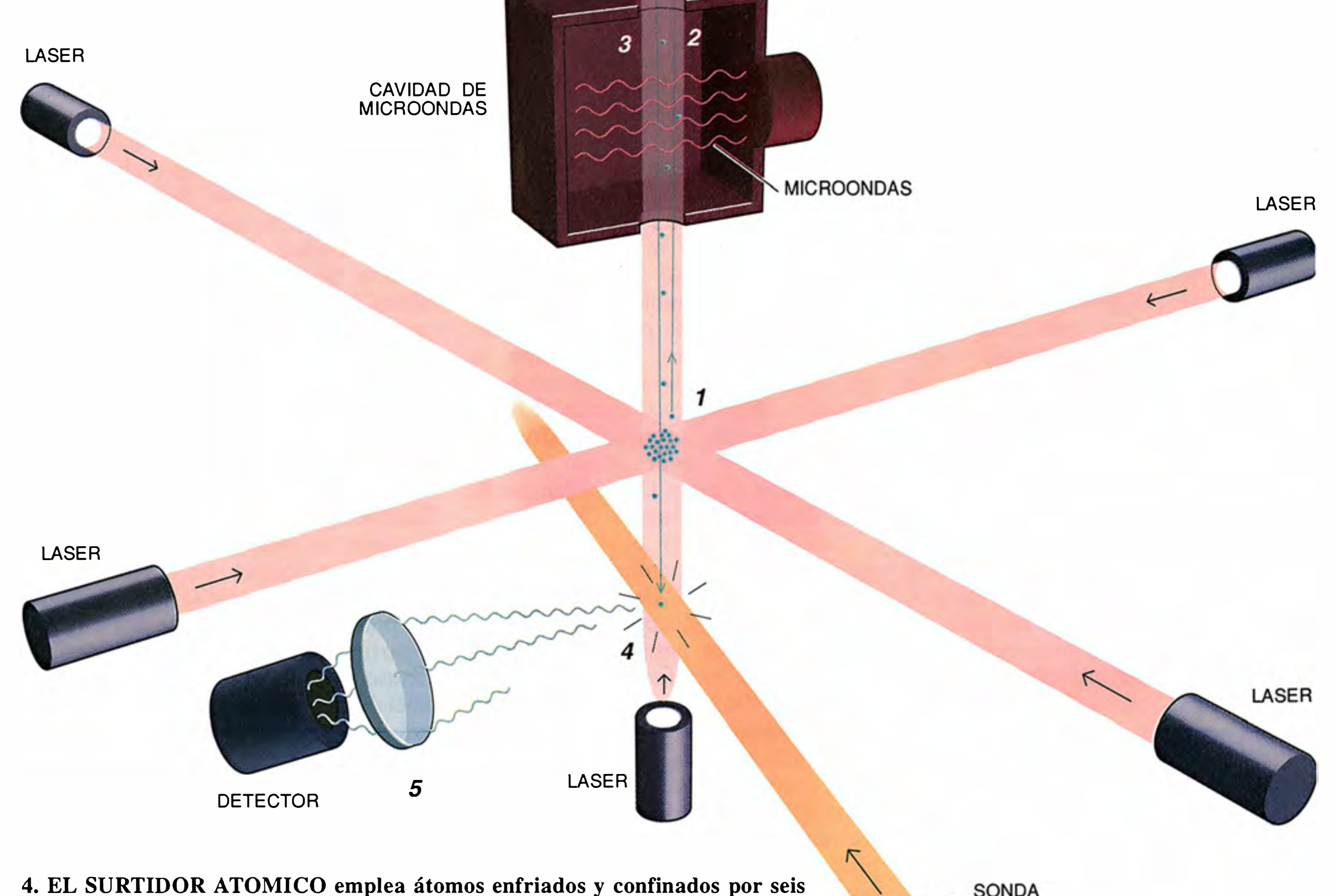
La oscilación se detecta mediante un bucle de alambre conductor instalado en la cavidad. El campo de microondas induce en el bucle una corriente que sale de la cavidad hacia una serie de circuitos, donde se la convierte en una señal de frecuencia más baja, apropiada para la generación de pulsos temporizadores.

La frecuencia de resonancia en el máser de hidrógeno es de unos 1420 megahertz, mucho más baja que la frecuencia de resonancia del cesio. Pero como los átomos de hidrógeno permanecen en la ampolla mucho más tiempo que los de cesio en el haz, la anchura de resonancia del máser es mucho menor. En consecuencia, el Q de un patrón construido a partir de un máser de hidrógeno es de aproximadamente 10^9, un orden de magnitud mejor que la del reloj atómico de cesio. Además, la estabilidad del máser de hidrógeno, superior a una parte en 10^{15}, es mayor que la de cualquier otro patrón de frecuencia.

Desgraciadamente, el máser pierde al cabo de unos días su superioridad respecto a los relojes de haces de cesio. La frecuencia de resonancia de la cavidad cambia, lo que reduce la estabilidad, y los choques entre los átomos y la cámara producen desplazamientos de frecuencia de aproximadamente una parte en 10^{11}.

Una manera de resolver el problema es enfriar el máser a muy bajas temperaturas. En esas condiciones se almacenan más átomos (con lo que la señal es más intensa) y se reduce el ruido electrónico. También mejora el rendimiento si se recubren las paredes interiores de la ampolla con helio líquido superfluido. Esta substancia actúa como una buena superficie en la que los átomos de hidrógeno rebotan. La obtención de mejores imanes, substancias de recubrimiento y técnicas de servobucle (que mantienen la resonancia de la cavidad centrada en la resonancia atómica) es otro camino que se sigue en busca de una mayor estabilidad para el máser.

Aunque el de haz atómico de cesio es el patrón de frecuencia a largo plazo más exacto de que dispone-



4. EL SURTIDOR ATOMICO emplea átomos enfriados y confinados por seis haces láser (*1*). Los haces verticales impulsan brevemente los átomos hacia arriba. Pasan éstos entonces a través de la cavidad de microondas (*2*), y vuelven a hacerlo al descender (*3*). El resto del proceso es semejante al de los patrones de haz atómico bombeados ópticamente: los átomos pasan a través de otro haz láser (*4*) y su fluorescencia es registrada por un fotodetector (*5*). Los servobucles y los divisores de frecuencia (*no representados*) generan impulsos con los que se mide el tiempo.

mos, algunos logros indican que es posible fabricar relojes aún más precisos. Cabe esperar muy buenos resultados del que se basa en la frecuencia de resonancia de iones confinados. Estos pueden ser suspendidos en un vacío de modo que estén casi perfectamente aislados de toda influencia perturbadora. Como todos tienen la misma carga eléctrica, los iones mismos permanecen bien separados entre sí. No sufrirán, por tanto, colisiones con otras partículas o con las paredes de la cámara. El confinamiento de los iones puede mantenerse durante largos períodos, a veces hasta varios días.

Se usan trampas de dos clases diferentes para encerrarlos. En la trampa de Penning, una combinación de campos eléctricos estáticos no uniformes y de campos magnéticos estáticos uniformes atrapa los iones; en la de radiofrecuencia (a menudo llamada trampa de Paul), es un campo eléctrico oscilante no uniforme el que lo hace. Cada una de estas trampas tiene su propio inconveniente característico. Los intensos campos magnéticos de las trampas de Penning alteran la frecuencia de resonancia. El campo eléctrico de las trampas de Paul crea efectos térmicos que causan corrimientos Doppler. La elección del tipo de trampa viene dada por su adecuación al montaje experimental concreto de que en cada caso se trate.

En Hewlett-Packard y en el Laboratorio de Propulsión a Chorro de Pasadena, California, entre otros lugares, se han fabricado patrones experimentales por medio de trampas de Paul. Las partículas aprisionadas eran iones de mercurio 199. Se eligió este ion porque, de todos los átomos a los que se puede aplicar la técnica del confinamiento, es el que más alta frecuencia hiperfina —40,5 gigahertz— tiene. Algunos millones de iones quedan encerrados entre los campos eléctricos generados por los electrodos. Se los bombea ópticamente mediante la radiación ultravioleta de una lámpara. El funcionamiento subsiguiente se parece al de los patrones bombeados con luz, pero los Q máximos de los patrones de iones confinados sobrepasan 10^{12}. Este valor es 10.000 veces mayor que el de los relojes de haz de cesio actuales. Sus estabilidades a corto plazo son también muy buenas, aunque no llegan a las de los máseres de hidrógeno. El corrimiento Doppler de segundo orden limita la reproducibilidad a alrededor de una parte en 10^{13}.

Los desplazamientos Doppler pueden reducirse mucho enfriando el láser. En 1975, David J. Wineland, Hans G. Dehmelt, Theodor W. Hänsch y Arthur L. Schawlow desarrollaron la técnica correspondiente, que, en esencia, consiste en reducir la velocidad de los iones mediante un haz de luz láser. Las partículas dirigidas contra el haz láser absorben parte de la cantidad de movimiento de los fotones de éste y, como resultado, se frenan. Para compensar el efecto Doppler que se produce mientras las partículas se mueven hacia el haz, se ajusta éste a una frecuencia ligeramente más baja que la producida por una transición de resonancia muy permitida.

Muchos laboratorios están desarrollando patrones de frecuencia por el método del confinamiento y enfriamiento de iones. Se ha construido uno basado en iones de berilio 9 enfriados por láser en una trampa de Penning. Su reproducibilidad, limitada como está por los choques de los iones con moléculas neutras, viene a ser de una parte en 10^{13}. Puesto que la incertidumbre debida al corrimiento Doppler de segundo orden es sólo de unas cinco partes en 10^{15}, la mejora de la calidad del vacío debería aumentar apreciablemente la reproducibilidad.

En los últimos años se ha progresado espectacularmente en el encierro y enfriamiento de átomos neutros, tarea más difícil que en el caso de los iones. Se obtiene un excelente enfriamiento con tres pares de haces de láser dirigidos en sentidos opuestos a lo largo de tres direcciones mutuamente perpendiculares. De esta manera todo átomo resultará frenado, cualquiera que sea la dirección en que se mueva. Este sistema recibe el nombre de "melaza óptica". A su elaboración han contribuido diversos investigadores, entre ellos William D. Phillips, Claude Cohen-Tannoudji, Jean Dalibard y Steven Chu.

Las trampas de átomos neutros pueden almacenar átomos con mayor densidad que las de iones porque éstos, al estar eléctricamente cargados, se separan entre sí a causa de su repulsión mutua. A igualdad de los demás factores, un mayor número de átomos da por resultado una razón más elevada de señal a ruido.

El principal obstáculo con que tropieza el uso de átomos neutros como patrones de frecuencia es que los campos láser alteran mucho las resonancias de los átomos encerrados en la trampa. Un dispositivo, el "surtidor atómico", permite superar esta dificultad. Las trampas capturan y enfrían un grupo de átomos; a éstos se les aplica entonces un impulso hacia arriba, de manera que se sitúen en una región libre de luz láser; pero los átomos vuelven a caer por efecto de la gravedad. Al subir y al bajar atraviesan un campo oscilante. Se inducen así transiciones de resonancia tal y como se hace en el aparato de haz de campos oscilatorios separados.

El Q de un sistema como el descrito puede ser más alto que el de un haz atómico porque el intervalo de tiempo entre una y otra travesía del campo es más largo. Chu y sus colaboradores, y André Clairon, Christophe Salomon y su equipo han realizado experimentos relativos a los surtidores atómicos.

Buena parte de la investigación actual se centra en los iones enfriados por láser en trampas que resuenan en el dominio óptico, donde las frecuencias son de muchos miles de gigahertz. Estos patrones disfrutan de un Q muy elevado; podrían, pues, ser la base de relojes muy exactos. Los investigadores del NIST han observado un Q de 10^{13} en la resonancia ultravioleta de un ion individualmente atrapado y enfriado por láser. Es el mayor Q que jamás se haya observado en una resonancia atómica, sea óptica o en microondas. Debido a dificultades técnicas, sin embargo, ninguno de los relojes de frecuencia óptica construidos hasta ahora ha podido funcionar durante períodos largos.

Podría dar la impresión de que la gran variedad de patrones de frecuencia de altas prestaciones disponibles hoy en día hace innecesaria la creación de aparatos aún más finos. Después de todo, los actuales relojes atómicos son tan exactos que han obligado a redefinir algunas unidades básicas. Como se dijo más arriba, el segundo se basa ahora en la frecuencia de resonancia del átomo de cesio. También por acuerdo internacional, el metro se define como la distancia que la luz recorre en 1/299.792.458 de segundo. La unidad de diferencia de potencial eléctrico se materializa a partir de la frecuencia característica asociada a una diferencia de potencial que aparece en los circuitos superconductores, en la llamada unión de Josephson.

Hay, sin embargo, campos donde se pone a prueba la capacidad de los relojes modernos. La radioastronomía es un buen ejemplo. A menudo las observaciones se llevan a cabo con varios telescopios separados por distancias de miles de kilómetros. Esta técnica aumenta enormemente la resolución. Dos radiotelescopios distantes entre sí 10.000 kilómetros tienen una resolución angular efectiva

que es más de un millón de veces superior a la que cada uno tiene por sí solo. Pero para combinar de manera adecuada los datos de cada telescopio hay que saber con exactitud cuándo recibieron la señal. Los máseres de hidrógeno actuales tienen la estabilidad que esta tarea requiere. Los radiotelescopios instalados en naves espaciales seguramente exigirán relojes más estables.

Para la contrastación precisa de la teoría de la relatividad es esencial que los relojes sean muy estables. La medida del ritmo de púlsares que oscilen en milisegundos, algunos de los cuales son tan estables como los mejores relojes atómicos, ofrece indicios de la existencia de ondas gravitatorias. En 1978, Joseph H. Taylor Jr. y sus colaboradores hallaron que el período de cierto sistema binario de púlsares ha variado con el tiempo precisamente en la medida que cabría esperar en caso de que perdiese energía por radiación gravitatoria, como predice la relatividad general. Como la precisión sería mayor si las medidas se realizasen a lo largo de muchos años, convendría disponer de relojes con mejor estabilidad a largo plazo.

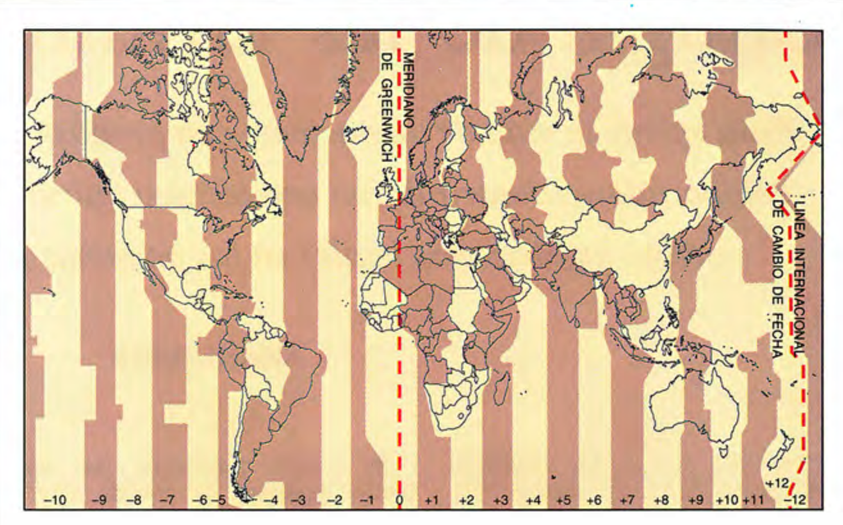
En otras comprobaciones de la relatividad, Vessot y sus colaboradores confirmaron el adelanto de los relojes a grandes alturas predicho por la teoría. Enviaron un máser de hidrógeno a bordo de un cohete y midieron la pequeña variación relativista de los relojes con una precisión del 0,007 por ciento a una altura de 10.000 kilómetros. Irwin I. Shapiro ha utilizado también relojes muy estables para observar el retardo relativista que una señal luminosa sufre al pasar junto al Sol.

La medida ultraprecisa del tiempo tiene también aplicaciones más prácticas. A la navegación le es particularmente útil. Para determinar la posición exacta del *Voyager 2* a su paso por Neptuno se emplearon tres telescopios de radar muy distantes entre sí. A partir de la distancia que le separaba de cada uno de ellos pudo hallarse dónde se encontraba. Cada una de esas distancias se obtuvo, a su vez, a partir de medidas muy precisas de las ocho horas que tardaba la luz en ir de cada telescopio al vehículo espacial y volver.

Por supuesto, la navegación también es importante en la Tierra. Una de las últimas aplicaciones de los relojes muy exactos es el Sistema de Posicionamiento Global (SPG). Consta de una serie de satélites en órbita que transportan relojes atómicos. El objetivo es que, gracias al SPG, cualquiera que tenga un receptor de radio apropiado y un ordenador pueda determinar su posición con un error aproximado de 10 metros y la hora con una precisión superior a los 10^{-7} segundos. Dos estaciones de control que sigan a un mismo satélite pueden sincronizar sus relojes con un margen de coincidencia de unos cuantos nanosegundos.

Se espera que el SPG tenga una gran variedad de usos prácticos, tales como la determinación precisa de las coordenadas de buques, aviones e incluso automóviles privados. Sirvió en la Guerra del Golfo Pérsico de 1991 para que las tropas conociesen su situación en el desierto. Por menos de mil dólares se pueden adquirir receptores comerciales, pero la precisión de la versión civil del dispositivo es de sólo unos cien metros. La razón es que las señales transmitidas por los satélites se deforman deliberadamente. El conjunto completo tendría 24 satélites, que darían cobertura mundial durante las 24 horas. El sistema casi está desarrollado del todo.

Estas y otras aplicaciones muestran la importancia de los patrones de tiempo y frecuencia. A medida que, como se espera, mejoren, progresará la calidad de las aplicaciones actuales y se abrirá el camino para otras nuevas. Cuáles sean, sólo el tiempo podrá decirlo.



Coordinación de las escalas de tiempo

En este artículo hemos hablado de la medida de un intervalo de tiempo, como un minuto o un segundo. Para ello se requiere sólo un buen reloj. Pero si se quiere decir que un suceso tuvo lugar a una hora dada, por ejemplo, 22 segundos después de las 11 horas 31 minutos de la noche del 5 de septiembre de 1993, hay que proceder antes a una sincronización con un reloj que se tome, por acuerdo mutuo, como patrón. El "patrón universal" existe, en teoría, y es el promedio de los mejores relojes del mundo. La Oficina Internacional de Pesas y Medidas de Sèvres, Francia, es la responsable de la coordinación internacional del tiempo. Esta escala coordinada se llama Tiempo Atómico Internacional, o TAI.

Muchas veces se necesita una escala de tiempo que vaya al compás de la rotación de la Tierra. Es decir, tal que, promediado a lo largo de un año, el Sol esté en su zenit en Greenwich a las doce de la mañana. El día determinado por la posición aparente del Sol es irregular y, en promedio, más largo que las 24 horas definidas por el TAI. Para compensar, se especifica otra escala, el Tiempo Universal Coordinado, o UTC, en la que se suma o resta ocasionalmente un número entero de segundos al TAI. Ello se hace generalmente el 31 de diciembre o el 30 de junio, para que el UTC no difiera más de 0,9 segundos del tiempo definido por la rotación de la Tierra. Para determinar el intervalo exacto entre dos instantes prefijados hay que consultar el archivo del salto de segundos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

FROM SUNDIALS TO ATOMIC CLOCKS: UNDERSTANDING TIME AND FREQUENCY. J. Jespersen y J. Fitz-Randolph. Dover, 1982.

HISTORY OF ATOMIC CLOCKS. N. F. Ramsey en *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, vol. 88, n.º 5, páginas 301-320, septiembre/ octubre de 1983.

TIME AND FREQUENCY. Número especial de *Proceedings of the IEEE*, vol. 79, n.º 7, julio de 1991.

Cirugía de las arritmias cardiacas

Para salvar la vida de un paciente con pronóstico ominoso, el autor y sus colaboradores desarrollaron una técnica quirúrgica, ahora habitual, que corrige taquicardias letales en las personas proclives a las mismas

Alden H. Harken

En 1978 uno de los vicepresidentes de cierto banco de Filadelfia se derrumbó sobre la mesa de trabajo, mientras su corazón empezaba a latir a una celeridad peligrosa. Para suerte suya, el personal de la oficina supo aplicarle en seguida la resucitación cardiopulmonar, manteniéndole vivo hasta la llegada del equipo de urgencias médicas. Le trasladaron al hospital clínico de la Universidad de Pennsylvania, en cuyo cuadro quirúrgico acababa yo de incorporarme.

Nadie imaginaba que, semanas más tarde, íbamos a ser los protagonistas de una pequeña parcela de la historia de la cirugía. Frustrados ante la muerte inevitable, e inminente, del banquero, mis colaboradores y yo ideamos un nuevo tratamiento quirúrgico para corregir el trastorno culpable del funcionamiento alterado de su corazón. De entonces acá, se cuentan por centenares los pacientes que se han beneficiado de esa intervención, mientras se ha ido aclarando la razón por la que nuestro método, nacido de la necesidad, resultó tan eficaz.

Recuerdo como si fuera hoy la valoración inicial que realizó el equipo sobre las condiciones del paciente. Cuando ingresó sospechamos que había sufrido un infarto de miocardio: necrosis del músculo cardiaco por bloqueo de la arteria que irriga el tejido afectado. Las pruebas, sin embargo, iban por otro lado. El músculo se hallaba en buen estado, salvo una zona pequeña interesada años atrás por un infarto.

ALDEN H. HARKEN es cardiocirujano, profesor y director del departamento de cirugía de la Universidad de Colorado en Denver, desde 1984. Tras doctorarse en medicina por la Universidad Case Western Research, pasó el período de residencia en dos hospitales bostonianos, el Peter Bent Brigham y el Pediátrico de Boston.

Su corazón funcionaba mal ahora porque presentó, de repente, una letal inestabilidad eléctrica. El sistema de conexiones eléctricas que regula el ritmo cardiaco insta que el miocardio se contraiga y empuje la sangre hacia las arterias unas 72 veces por minuto. Pero el músculo del paciente había empezado a recibir señales mucho más frecuentes, con la aceleración consiguiente del bombeo. Si el corazón late con excesiva rapidez, sus cavidades interiores no tienen tiempo para llenarse de sangre; el órgano no puede, entonces, impulsar lo que no recibe, y cae así de forma drástica el envío de la sangre hacia los tejidos, incluido el propio miocardio, provocándose la parada del corazón.

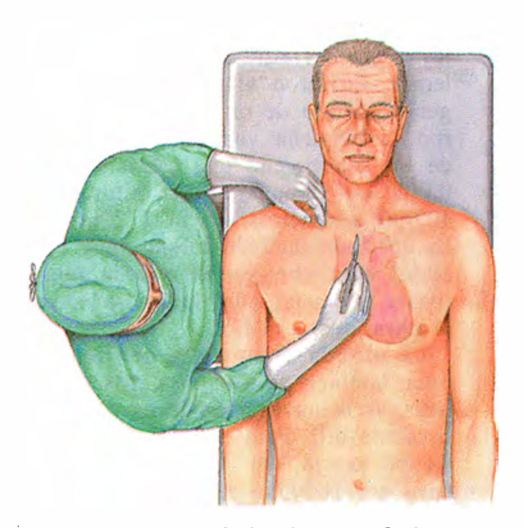
Aunque esperábamos en un comienzo ver las huellas de un nuevo infarto, no nos vino de nuevas observar la alteración eléctrica del banquero. Seis años antes Hein J. J. Wellens, cuando trabajaba en la Universidad de Limburg, había comprobado el bombeo acelerado en los pacientes que hacía meses o años habían sufrido un infarto.

Sabíamos también que la medicación indicada para prevenir arritmias lograba a veces restablecer el funcionamiento normal en algunos individuos. Acudimos, pues, a los fármacos. Uno tras otro fracasaron. En las tres semanas de hospitalización que llevaba, con tres paros cardiacos además, el banquero se aproximaba, era opinión común, a un desenlace fatal. Y él lo sabía.

En aquel tiempo yo tenía el privilegio de trabajar con Mark E. Josephson y Leonard N. Horowitz, especialistas en el diagnóstico de anormalidades eléctricas del corazón. Para ellos, el problema yacía en una cardiopatía denominada circuito eléctrico por reentrada. Ante ese diagnóstico, se nos ocurrió acudir a la vía quirúrgica para cortar el circuito.

Para entender nuestro enfoque, conviene conocer las líneas esenciales del mecanismo a través del cual el sistema eléctrico del corazón controla la actividad cardiaca. El corazón, que consta de cuatro cavidades, viene a ser un balón de músculo (miocardio) con tejido de conducción: fibras unitarias que tejen una suerte de sistema nervioso interno. Estas fibras especiales conducen con celeridad los impulsos eléctricos hacia la masa del músculo cardiaco.

En respuesta a esos estímulos, se contrae el músculo; lo hace primero la parte superior del corazón y, muy



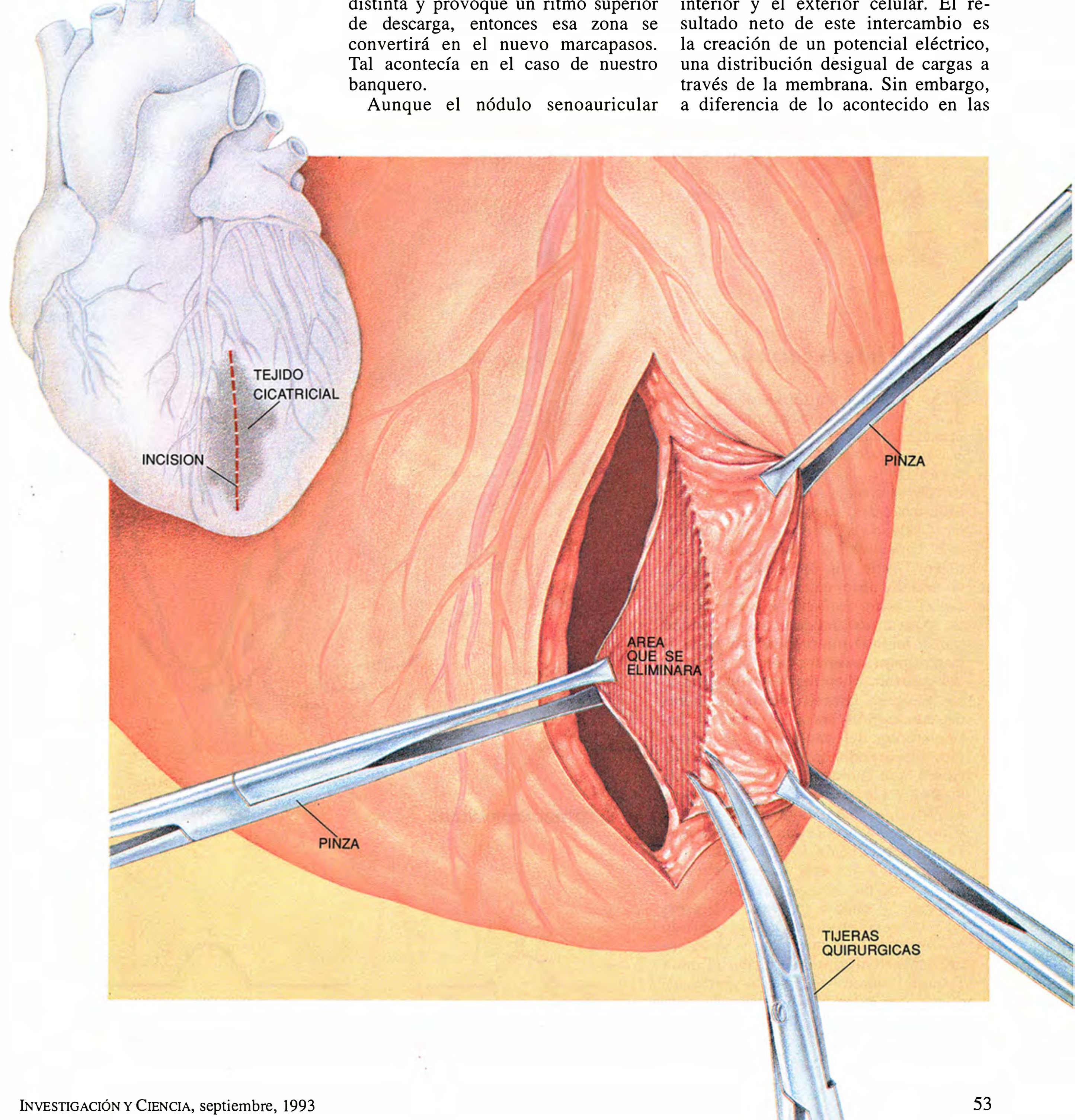
1. LA INTERVENCION QUIRURGICA, que puede salvar la vida de un paciente, implica la escisión de un colgajo del músculo enfermo (*área rayada en la imagen de la derecha*), de unos tres centímetros cuadrados de superficie y varios milímetros de espesor, de la superficie interna del corazón. La operación detiene la propagación de impulsos a través de un circuito reentrante, que puede presentarse meses o años después de un infarto de miocardio y alterar fatalmente los ritmos cardiacos normales. El cirujano ha accedido al ventrículo izquierdo a través de una incisión (*línea interrumpida dentro del recuadro*) en el tejido muerto de la cicatriz (*área sombreada*) que dejó tras de sí el infarto. Las pinzas sostienen los bordes de la incisión.

pronto, la inferior. Cuando comienza la contracción, la sangre venosa sale expulsada de la aurícula derecha (una de las dos cavidades superiores) hacia el ventrículo derecho. El ventrículo impulsa, entonces, la sangre hacia la circulación pulmonar, que la reabastece de oxígeno y la envía hacia la parte izquierda del corazón. En una acción paralela a esos episodios de la parte derecha, el músculo bombea sangre recién oxigenada desde la aurícula izquierda hacia el ventrículo izquierdo y desde allí hacia la aorta, que la distribuye por el organismo entero.

La señal que pone en marcha toda esa actividad emana del nódulo senoauricular, un cúmulo de células del tejido de conducción. Compete al nódulo, alojado en la parte superior de la aurícula derecha, establecer el ritmo del corazón; de ahí su nombre familiar de marcapasos cardiaco. Marca el ritmo por la sencilla razón de que envía impulsos con mayor celeridad que las demás regiones cardiacas, una vez cada 830 milisegundos. Ahora bien, si se presenta algo que excite una zona cardiaca distinta y provoque un ritmo superior de descarga, entonces esa zona se convertirá en el nuevo marcapasos. Tal acontecía en el caso de nuestro banquero.

Aunque el nódulo senoauricular pueda responder a señales externas, de fuera del corazón, lo normal es que se active de manera espontánea gracias a su automatismo distintivo. En otras palabras, funciona con "piloto automático".

Este automatismo tiene su origen en una permeabilidad especial de la membrana que rodea las células del nódulo. Lo mismo que ocurre con las películas que envuelven miocitos y neuronas, la membranas de las células del nódulo están festoneadas con bombas que transportan iones en ambos sentidos, hacia el interior y el exterior celular. El resultado neto de este intercambio es la creación de un potencial eléctrico, una distribución desigual de cargas a través de la membrana. Sin embargo, a diferencia de lo acontecido en las



células nerviosas y musculares, que mantienen su potencial de reposo hasta la llegada de un estímulo externo, las células del nódulo dejan que ciertos iones vuelvan a salir de las células. Este flujo hacia el exterior reduce el potencial de membrana hasta un valor crítico.

En ese punto, la membrana permite la entrada de otros iones hacia el interior. Ingreso que despolariza momentáneamente las células (elimina el potencial de membrana) e invierte incluso la polaridad de la membrana. Esta despolarización constituye un impulso. Una vez generado éste, las células se repolarizan y se preparan para una nueva descarga.

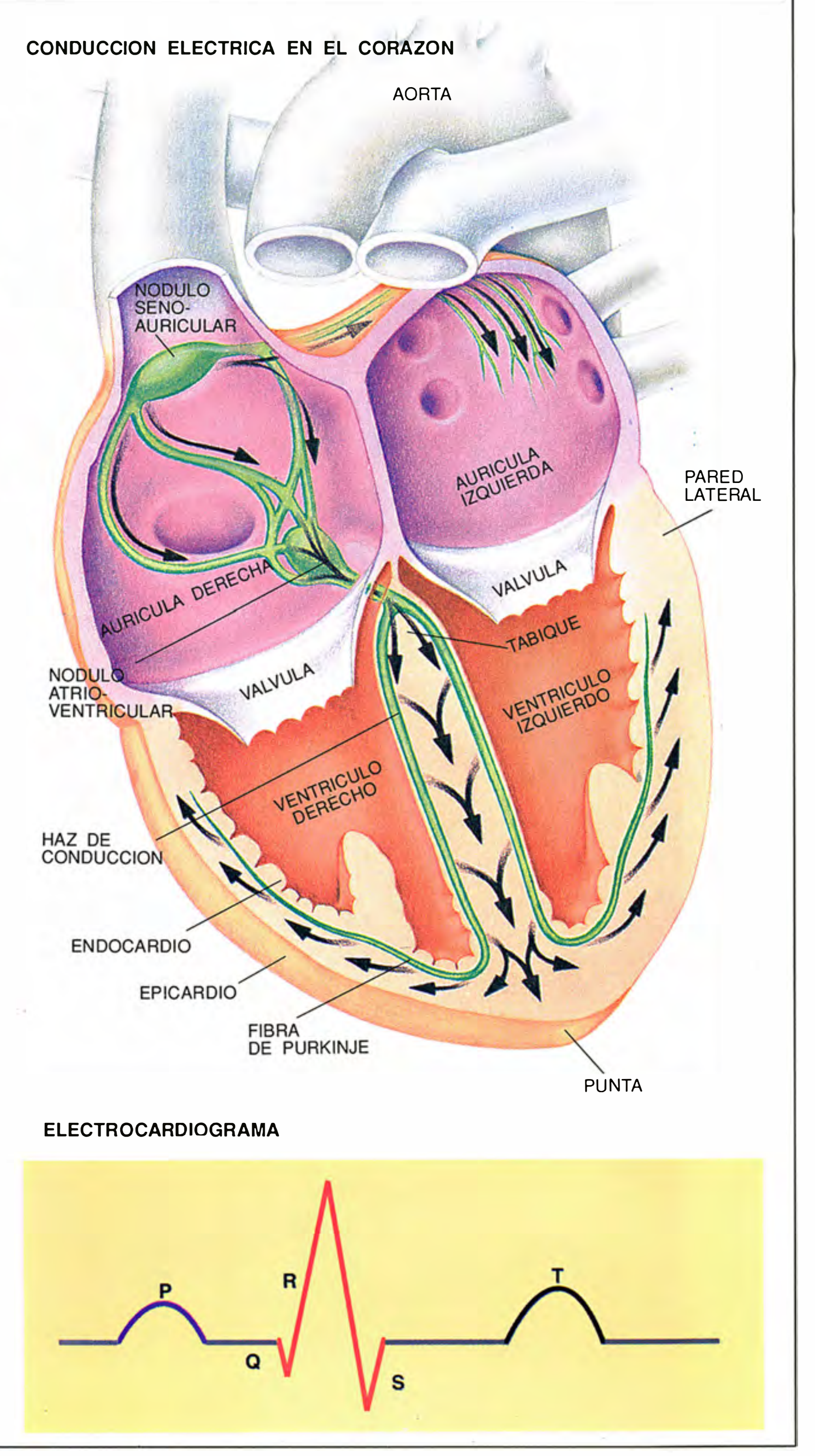
Los impulsos surgidos en una célula del nódulo senoauricular se aceleran instantáneamente a través del resto nodular; desde allí, se extienden hacia todo el corazón en el plazo de 160 a 200 milisegundos. En su marcha a través de las fibras de conducción, recorren primero ambas aurículas y, después, se reagrupan en el nódulo auriculoventricular, un agregado celular de la parte superior central de los ventrículos. Después

FLUJO DE SANGRE EN EL CORAZON

VENA CAVA SUPERIOR
AORTA
ARTERIA PULMONAR
VENAS PULMONARES IZQUIERDAS
PULMON
VENA CAVA INFERIOR

Así late el corazón

De la regulación uniforme del ritmo cardiaco se encarga un sistema de conducción eléctrica especial (*verde en el corazón grande*). Los impulsos (*flechas negras en la imagen de la derecha*) que inducen el bombeo se producen, a intervalos establecidos, en el nódulo senoauricular (*óvalo verde arriba a la izquierda*); éste constituye el "marcapasos" cardiaco. Desde allí, se encaminan hacia el nódulo atrioventricular (*en la parte superior de los ventrículos*); tras una breve pausa, descienden con celeridad por el tabique interventricular hacia la punta, para ascender por los costados del corazón. Mientras tanto, los impulsos emigran también desde las fibras de conducción hacia el músculo suprayacente, del endocardio al epicardio, disparando con ello las contracciones que fuerzan el movimiento de la sangre (*flechas en el pequeño diagrama de arriba*), primero dentro del corazón y después su salida hacia las arterias. La propagación de la electricidad por el corazón sano origina el electrograma típico que aparece al fondo a la derecha. La onda P (*púrpura*) y la onda QRS (*rojo*) se producen con el paso de los impulsos por aurículas y ventrículos, respectivamente; se forma la onda T (*negro*) cuando las células cardiacas, que no pueden estimularse durante cierto intervalo temporal, recuperan su excitabilidad.



de una pausa, descienden por los ventrículos a lo largo del cable de conducción, que se bifurca en dos haces; los haces de conducción se ramifican, a su vez, y configuran estructuras dendriformes de proyecciones más finas, las fibras de Purkinje. Cada ventrículo dispone de uno de estos haces ramificados, que mandan señales, vía la superficie del tabique (o pared que divide ambos ventrículos), hacia la punta del corazón y, desde allí, ascienden por la superficie interna de las paredes externas (laterales) hacia la parte superior del ventrículo.

Con la llegada de los impulsos de las fibras de conducción al músculo, se activan las células suprayacentes. Las células musculares pueden también transmitir impulsos, aunque más lentamente que las fibras de conducción. Se despolarizan las células del endocardio (la superficie interna de la pared) y transmiten los impulsos, a través de la masa muscular, hacia la superficie externa (el epicardio). La despolarización, a su vez, dispara la contracción.

Josephson y Horowitz sugirieron que las células enfermas habían estropeado el flujo normal de la electricidad en el corazón del banquero. Después de un infarto, muchas de las células que rodean el grupo necrótico de la cicatriz (resultante de la falta de riego sanguíneo) siguen viviendo, aunque con la actividad eléctrica alterada; podrían conducir impulsos a una velocidad muy por debajo de la normal o bien dispararse cuando les toca mantenerse inactivas.

Estas áreas enfermas podrían perturbar el proceso fluido de señales y formar un circuito reentrante en el músculo, una vía de conducción eléctrica mediante la cual los impulsos circulan repetidamente sin extinguirse. En el caso de nuestro paciente, se pensaba que el circuito se encontraba en el ventrículo izquierdo, donde había tenido lugar su primer infarto; era lo habitual en tales pacientes. (La activación de los circuitos reentrantes algún tiempo después de producirse el ataque cardiaco acontece, se supone, en un 10 % de las personas que sufren un infarto de miocardio.)

Para hacernos una imagen de la circulación de los impulsos a través de un circuito de reentrada, pensemos en el comportamiento de una onda de impulsos que se presenta en el fondo de una cicatriz oval del ventrículo izquierdo. Al alcanzar la cicatriz, la onda de impulsos se dividirá en dos, para rodear así ambos lados del área necrosada. Si las células enfermas interrumpieran los impulsos que se propagan a lo largo de una rama, los impulsos podrían todavía fluir por la rama opuesta y alcanzar el otro extremo de la cicatriz oval; podrían entonces atravesar la vía bloqueada y volver al comienzo del circuito, a la región de origen.

Si este circuito se recorriera con suficiente lentitud, la región de origen, repolarizada, podría responder de nuevo al estímulo. (Durante el período que las células necesitan para despolarizarse y repolarizarse, suelen mostrarse refractarias, incapaces de responder a los nuevos impulsos.) En dicho caso, los impulsos podrían reexcitar el origen, enviando descargas al circuito enfermo y hacia el resto del músculo ventricular. A pesar de la lentitud de la conducción, los impulsos podrían completar el circuito en un tiempo más corto que el intervalo entre latidos normales. De ahí que el reciclaje persistente podría hacer que el origen del circuito se convirtiese en un nuevo marcapasos y provocar una taquicardia ventricular sostenida, con el consiguiente bombeo, excesivamente rápido, hacia los ventrículos.

Conocíamos la posibilidad real de una trasmisión continua a través de los circuitos de reentrada; Wellens había identificado ya ese fenómeno en los años setenta. Pero había hecho más, para nuestra fortuna: había ideado un procedimiento para determinar si un circuito quiescente permanece al acecho y torna a manifestarse en un paciente que sobrevive a un episodio de taquicardia grave y si alguno de los medicamentos existentes puede evitar la activación renovada de ese circuito. El especialista implanta un electrodo en el corazón a través de un catéter contador y envía impulsos con una frecuencia determinada. La iniciación de latidos prematuramente sostenidos confirma que el enfermo tiene una vía de reentrada. (Por contra, los impulsos que se envían a un corazón sano provocan contracciones aisladas que no se repiten.) En un segundo paso se administra al paciente medicación antiarrítmica. Si los estímulos inducidos no disparan una taquicardia sostenida, sabremos que la medicación resultará eficaz.

Cuando Josephson y Horowitz aplicaron este procedimiento al banquero, observaron que se le inducía una taquicardia persistente; por consiguiente, de nada le servían los fármacos antiarrítmicos. Me reuní con ellos en su laboratorio de cateterización. Conscientes de que el enfermo era portador de una vía en el interior del corazón que ponía en peligro su vida, nos preguntamos si habría manera de evitar su activación suprimiendo quirúrgicamente todo el circuito o parte del mismo, en particular la región de origen. Eramos conscientes de que el plan podía fallar y de que la propia extirpación de tejido podría crear nuevos problemas. Nos encontrábamos en un callejón sin salida.

Antes de seguir adelante, había que dar con el marcapasos renegado. Esperábamos lograrlo mediante el análisis de las señales que llegaban a un electrodo implantado directamente sobre la superficie interna o externa del corazón. Más en concreto, proyectamos inducir una taquicardia sostenida mediante un electrodo marcapasos. En cada contracción cardiaca mediríamos las corrientes eléctricas que se produjeran en un sitio determinado (un agregado celular) del contorno enfermo de la cicatriz resultante del infarto. Comenzaríamos en una posición que arbitrariamente designaríamos como las doce y seguiríamos en el sentido de las agujas del reloj hasta llegar de nuevo al comienzo.

Para dibujar el circuito, compararíamos el tiempo de activación eléctrica en cada región con el correspondiente al tejido sano. Las regiones que generasen corrientes antes que el tejido sano revelarían su pertenencia al circuito; y la primera área en excitarse sería el marcapasos. No podíamos apoyarnos en la electrocardiografía estándar porque carecía de la especificidad necesaria. En efecto, los trazados electrocardiográficos a los que estamos acostumbrados, y que se obtienen a través de los electrodos aplicados a la piel, reflejan la actividad integrada de muchos millares de células del corazón; no nos permitían identificar la zona exacta del músculo que se hallaba despolarizada en un instante dado.

No le faltaba razón a nuestro proyecto. Pero nadie hasta entonces había osado trazar el mapa de flujo de señales por medio de un registro directo de la superficie del corazón en pleno bombeo. ¿Sabríamos, además, interpretar los datos? Al día siguiente yo tenía que intervenir a otro paciente para extirparle un pulmón afectado por un cáncer. El enfermo accedió amablemente a que detectásemos las señales de la superficie externa de su corazón.

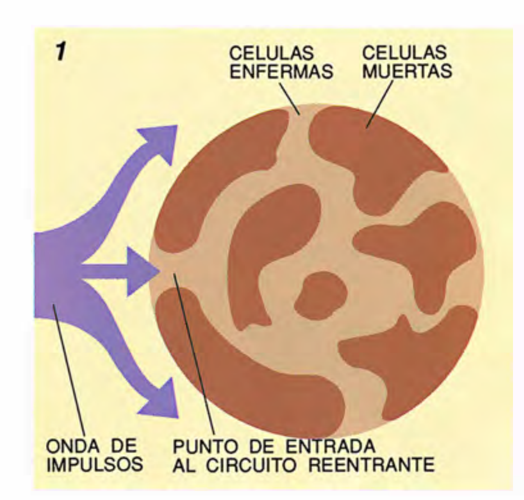
Nos alegró ver que podíamos discernir con toda claridad el momento en que una onda de impulsos atravesaba cualquier punto del músculo.

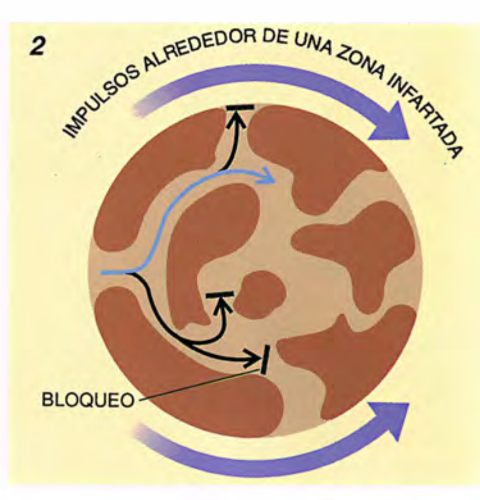
Me sentía, pues, respaldado para plantearle nuestra estrategia al banquero. Ignorábamos si el origen del circuito —la zona de activación precoz— estaba más cerca del interior o del exterior del músculo cardiaco; por tanto, trazaríamos el mapa de ambas superficies, la interna y la externa. Alcanzaríamos el interior abriendo el corazón a través de la cicatriz existente. (El corte a través del tejido sano destruiría tejido nuevo innecesariamente.) Si encontrábamos la región problemática, usaríamos la cirugía para extirparla. Se mantendría la circulación sanguínea del enfermo mediante su conexión a una máquina cardiopulmonar. Este dispositivo permite derivar la sangre venosa, no oxigenada, hacia un pulmón artificial; la sangre ya oxigenada se bombea de nuevo hacia la circulación arterial a través de la aorta.

Tras exponerle con todo lujo de detalles nuestra estrategia terapéutica, el banquero lanzó la pregunta temida: "¿Cuántas veces ha hecho usted esta operación?" "Nunca", le repuse. "Al menos se habrá hecho en muchos otros casos parecidos...". Le informé que nadie la había intentado hasta entonces. A pesar de respuestas tan poco alentadoras, me dirigió una sonrisa llena de confianza, y me animó: "¡adelante!"

La intervención comenzó al día siguiente por la mañana. Acotamos y extirpamos la región que tenía la actividad más precoz, situada en la superficie interna. (Hoy sabemos que casi todos los circuitos de reentrada se alojan en zonas del endocardio o en su vecindad.) Nuestro paciente volvió a su actividad normal y siguió progresando en su profesión. Desde hace unos años le he perdido la pista. Pero, pasados diez años del tratamiento quirúrgico, no había sufrido ninguna arritmia.

No todos los pacientes han sido tan afortunados. De cuantos se han sometido a la cirugía tras haber sobrevivido a un episodio de taquicardia persistente, el 9 por ciento no supera la intervención o fallece antes del primer mes; el 80 por ciento vive al menos durante un año sin recurrencia de la taquicardia, y el 60 por ciento sobrevive durante cinco años o más. En general puede decirse que los pacientes que más pueden beneficiarse de este tratamiento son aquellos cuyo miocardio esté menos alterado.

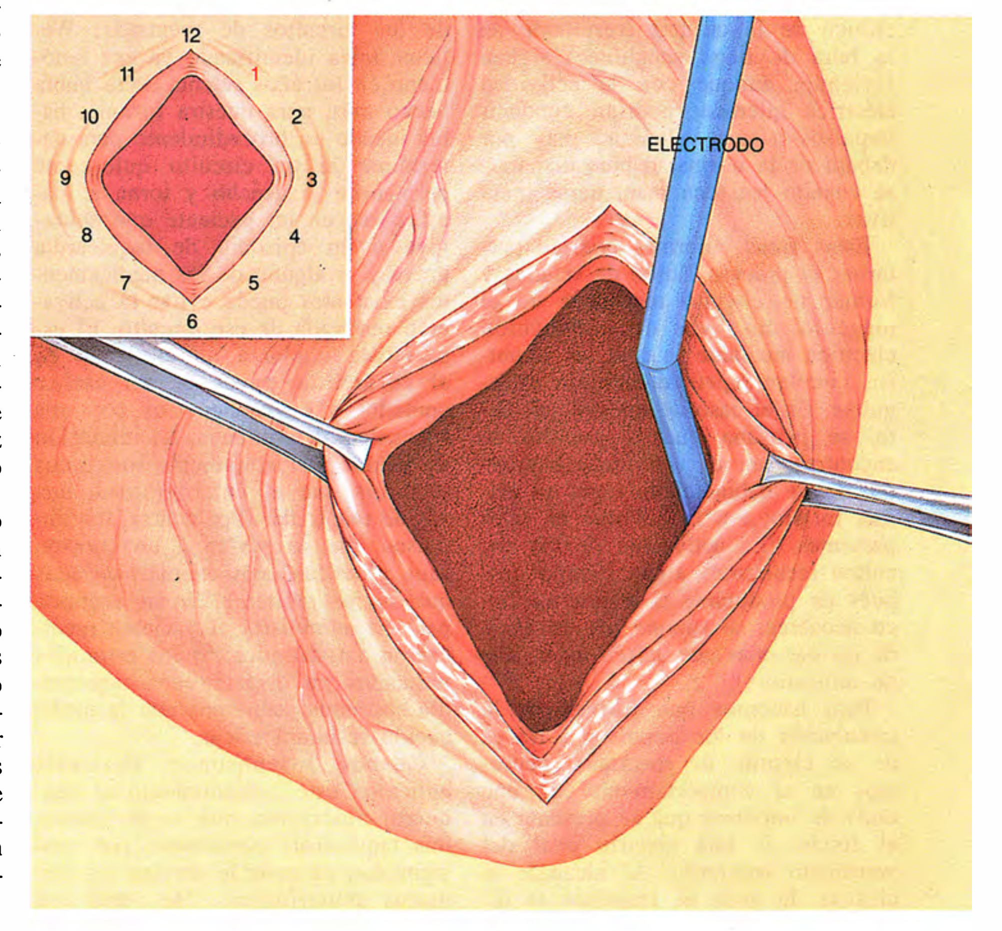


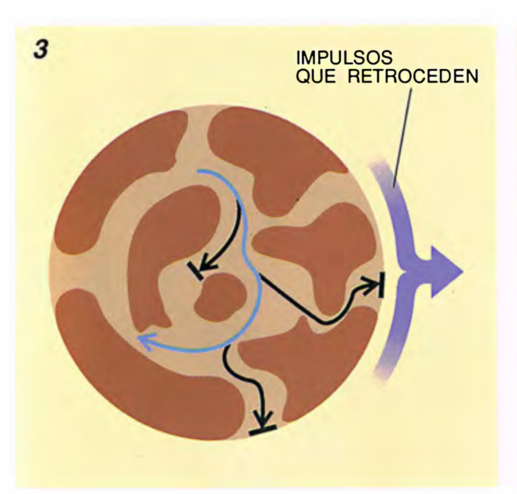


2. CIRCUITO REENTRANTE, un bucle cerrado a través del cual circulan los impulsos. El circuito de reentrada se ha formado en una zona de músculo cardiaco constituida por tejido enfermo (*beige*) e islotes de células muertas (*marrón*). La actividad eléctrica continua en ese circuito usurpa la función normal de marcapasos que compete al nódulo senoauricular y provoca una taquicardia ventricular (un ritmo cardiaco peligrosamente rápido). Se inicia un ciclo persistente cuando una ola de impulsos (*flechas azules en 1*) penetra en la zona y se divide (*2*) en el punto de

En 1978 comprobamos que las vías de reentrada no necesitan ser tan extensas como supusimos en un comienzo. También las microscópicas encierran igual peligro, amén de abundar más, según parece.

La idea de la existencia de los microcircuitos de reentrada se le ocurrió en los años setenta a James L. Cox, cirujano entonces adscrito a la Universidad de Duke. En su opinión, zonas pequeñas de tejido beteado, formado por células enfermas y distribuidas por islas de células muertas, podrían crear las condiciones necesarias para establecer la taquicardia de reentrada. En estos circuitos microscópicos, los impul-







entrada. Si las señales que recorren una vía (*flecha negra de 2 cabezas*) se encuentran con un bloqueo transitorio (*línea vertical*), las señales que avanzan por una segunda vía (*flecha azul delgada*) puede retornar a la región de entrada (*3*), u origen, a través de la vía antes bloqueada. Si la región de entrada ha recuperado su excitabilidad (*4*), los impulsos que vuelven reexcitarán esa área. Los impulsos pueden dispersarse así por el tejido muscular sano (*flechas verdes gruesas*) y retornar a través del circuito problemático una y otra vez (*flecha verde fina*).

sos que encontrasen una vía dividida en un punto de entrada hacia zonas enfermas podrían escindirse y viajar por ambas rutas. A imagen de lo descrito sobre los macrocircuitos de reentrada, los impulsos que se propagan por una rama acabarán encontrando bloqueada una vía. Pero, al propio tiempo, los impulsos que recorren la otra acabarán zigzagueando por un laberinto de células enfermas para retornar a la vía antes cerrada.

Si la conducción a través del tejido enfermo procediera con parsimonia suficiente, los impulsos retornarían de nuevo a la región de entrada, u origen del circuito, después de que ese lugar hubiera dejado de ser refractario. La excitación del origen estimularía entonces el músculo ventricular para contraerlo y enviaría impulsos una y otra vez hacia el microcircuito. El circuito de reentrada no viajaría por el óvalo de la cicatriz, sino que trazaría una vía recurrente a través de un laberinto celular más circunscrito, en el borde enfermo entre la cicatriz resultante de un infarto y el tejido normal.

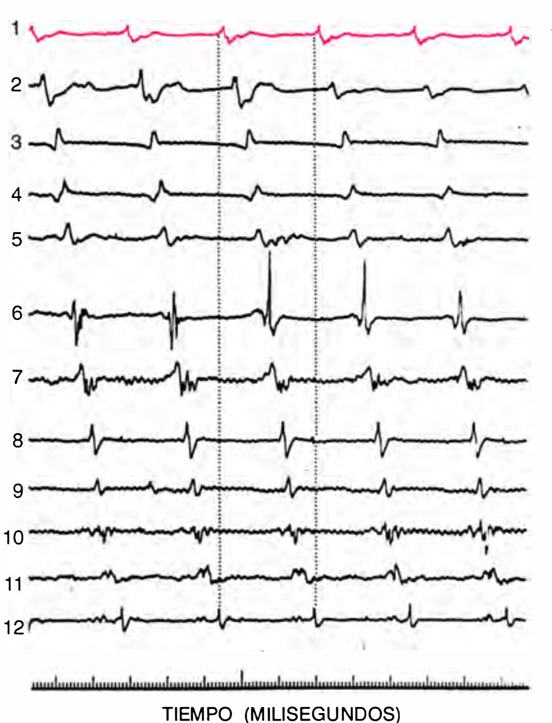
A comienzos de los ochenta, Glenn J. R. Whitman y Michael A. Grosso decidieron someter a prueba esa hipótesis. Crearon pequeñas zonas heterogéneas constituidas por una mezcla de células muertas y células vivas, pero enfermas, en los ventrículos de animales de laboratorio. Estos animales, que antes de la inducción eléctrica no mostraron tendencia a taquicardias sostenidas, se hicieron proclives a las mismas.

Whitman y Grosso partían de la idea siguiente: si el tejido beteado era defectuoso, la muerte de todas las células de la zona debería restablecer la actividad eléctrica normal. En vez de vagar por un laberinto peligroso, los impulsos que dieran con la zona homogénea de tejido muerto se extinguirían o la orillarían encaminándose hacia células sanas adyacentes. Cuando esas zonas beteadas se destruyeron, la predisposición de la arritmia se desvaneció.

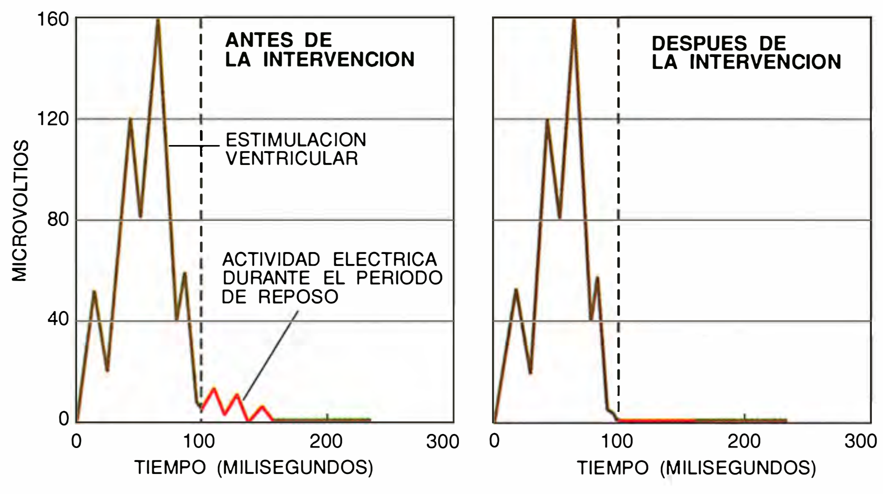
Estos hallazgos revelaban que el tejido beteado podía servir de base para la taquicardia de reentrada. También nos aclaraban por qué un tratamiento quirúrgico diferente ensayado por nosotros y por otros en varios pacientes no había dado el resultado apetecido. Creyendo que la cicatriz era la responsable de las alteraciones eléctricas, empezamos por extirpar el tejido muerto. El trabajo de Whitman y Grosso indicaba que este enfoque estaba condenado al fracaso, porque dejaba detrás al verdadero culpable: la zona donde se mezclan células vivas con células muertas.

Teníamos pendiente la resolución de dos cuestiones importantes, una científica y otra clínica. ¿Por qué no se activan, en los pacientes proclives, los circuitos de reentrada cada vez que el corazón se contrae? O lo que es lo mismo, ¿por qué transcurren meses y años antes de que los pacientes operados sufran alteraciones letales del ritmo? La segunda cuestión a abordar tenía que ver con la detección precoz del riesgo de taquicardia de reentrada mediante técnicas no invasivas.

Vayamos con el primer problema. La explicación simplista de la falta de activación del circuito de reentrada en cada latido cardiaco aducía que los impulsos disparados por el nódulo senoauricular no podían formar ciclos repetidos a través de la vía problemática. Al término de un primer ciclo, retornarían a un punto de comienzo que persiste en estado refractario; con el paso cerrado para



3. CARTOGRAFIA CARDIACA, levantada mediante el barrido del tejido enfermo que rodea una cicatriz resultante de un infarto con un electrodo (*azul*). El mapa sirve para descubrir la existencia de un circuito reentrante. En cierto paciente, los registros de la actividad eléctrica (*a la derecha*) realizados en 12 lugares (*recuadro a la izquierda*) en torno a la superficie interna, durante una taquicardia ventricular inducida, perfilaron un gran circuito eléctrico recurrente que comenzaba en la posición de la una del reloj (*línea 1*) y avanzaba en sentido horario alrededor de la cicatriz. Un cirujano puede bloquear la propagación del impulso por ese circuito mediante la escisión de la región de excitación más precoz, la que se supone constituye la región de origen del circuito.



4. ELECTROCARDIOGRAMAS ESPECIALES confeccionados mediante una técnica de promedio de señales. Se produjeron antes (*izquierda*) y después (*derecha*) de que un paciente fuese sometido a una intervención quirúrgica para evitar la transmisión continua de impulsos a través de una vía de reentrada. La línea roja dentada a la izquierda refleja una conducción eléctrica lenta y autolimitada a través de la vía problemática durante el período normalmente tranquilo que sigue a la excitación ventricular. El aplanamiento de la línea después de la intervención quirúrgica indica que se ha eliminado la conducción lenta a través del circuito potencialmente letal. Los electrocardiogramas en que se han promediado las señales permiten descubrir los pacientes que se hallan expuestos a arritmias de reentrada.

cursar por el circuito, se estancarían. Pero ese razonamiento dejaba en el aire la cuestión del reciclaje persistente. Con el tiempo hemos llegado a suponer que el ciclo se pone en marcha cuando, por un refinado infortunio, una célula eléctricamente irritable y próxima a una vía de reentrada se dispara sin más, en un estrechísimo intervalo temporal, entre una activación de los nódulos sinoatrial y atrioventricular y la activación siguiente.

A esta visión del proceso llegamos después de haber analizado los resultados de las investigaciones realizadas en las postrimerías de los setenta por E. Neil Moore y Joseph F. Spear, del hospital clínico de la Universidad de Pennsylvania. Mediante la impalación de células sobre electrodos diminutos y finísimos, Moore y Spear siguieron los cambios de potenciales de membrana operados en células del tejido cardiaco enfermo; las células se habían extraído de la zona en torno a las cicatrices procedentes de infartos. Tras despolarizarse, las células sanas tornan a polararizarse con suavidad. En las células enfermas, por el contrario, el potencial de membrana fluctúa notablemente durante el período de repolarización.

Supusimos que estas fluctuaciones provocarían una despolarización prematura o darían lugar a un impulso. Si hubiera una célula irritable junto a una vía de reentrada, podría muy bien insertar el impulso en el canal problemático durante el intervalo que media entre dos latidos normales.

Esta inserción podría activar un circuito reentrante. Pero no lo haría un impulso que se originase en el nódulo senoauricular, por la sencilla razón de que el tránsito reciente de un impulso por una vía altera las propiedades electroquímicas de esa vía y decelera la conducción de la señal subsiguiente. Así, el impulso emitido por la célula irritable podría recorrer el circuito con lentitud mayor que lo hiciera otra señal precedente y originada en el nódulo senoauricular.

Si la descarga del impulso extra se produjera en el momento oportuno, el impulso circulante volvería al punto de entrada en un momento mucho más devastador: después de que ese sitio hubiera recuperado la excitabilidad (y la capacidad, por ende, de reenviar el impulso circuito adelante), pero antes de que el nódulo senoauricular descargase por segunda vez (haciéndose, por tanto, con el control de la contracción del corazón). Alcanzada una diana receptiva, el impulso podría seguir dando todavía muchas vueltas en torno al circuito letal.

Nuestro segundo problema —el de la identificación de los pacientes con riesgo de taquicardia de reentrada— fue resuelto de una manera ingeniosísima por Michael B. Simson, de nuestro grupo. Cardiólogo de prestigio, es un entusiasta de los coches y los ordenadores. Cierto día, mientras volvía a casa, ya entrada la noche, se puso a pensar en el ruido eléctrico, o señales al parecer erráticas, que emanaban de la parte delantera de su coche. Si registrara las corrientes que llegaban al capó, razonaba, aparecería un caos de datos indescifrables. Pero si se pusiera a seguir la pista de los impulsos eléctricos que proceden del distribuidor en particular, entonces sí podría acotarlos promediando las señales.

Para aplicar este procedimiento registraría el voltaje y la dirección (el vector eléctrico) de las corrientes que fluyen hacia el capó, o que se separan de él, durante las fases operativas del rotor. Si sumase las señales obtenidas en medidas repetidas de una fase dada, las corrientes aleatorias tenderían a anularse entre sí, dejando un registro exclusivo de las corrientes generadas por el rotor. Dividiendo el resultado por el número de lecturas de una fase seleccionada se obtendría una medida de la corriente generada por el distribuidor en dicha fase.

¿Podría aplicarse ese método, pensó Michael Simson, a las víctimas de infartos y determinar así su proclividad hacia las taquicardias de reentrada? Promediando quizá las señales, detectaríase alguna actividad eléctrica, muy lenta, que persistiera después de que el flujo normal de señales atravesara los ventrículos. La mayor parte de la actividad extra que él encontrara reflejaría los impulsos que se propagaran, retardados, por un canal de reentrada potencialmente peligroso. Expuesto con llaneza: creía que podría aplicar electrodos en la piel igual que si se tratara de un electrocardiograma estándar, si bien registrando sólo las corrientes producidas en los 40 milisegundos inmediatos tras la formación de la típica onda QRS. (Esta ondulación de los electrocardiogramas refleja el avance de los impulsos a través de los ventrículos.) Las células del corazón suelen hallarse tranquilas en ese momento, por lo que el gráfico del electrocardiograma se convierte en una línea continua. Las desviaciones de este patrón normal que experimente la media de señales delatarían una circulación lenta en una vía de reentrada.

Simson se pasó la noche entera construyendo un aparato de promediación de señales. Al día siguiente, Josephson, Horowitz y yo teníamos asignada una intervención quirúrgica para eliminar el tejido causante de una arritmia de reentrada. Antes de

la operación, Simson aplicó su nuevo registrador al paciente y comprobó, de acuerdo con lo esperado, que se producía una cascada de actividad eléctrica en el intervalo, de ordinario quiescente, que sigue a la excitación ventricular. Pero, ¿constituía aquella señal un indicio real de conducción de un impulso retrasado en un circuito de reentrada? La respuesta sería afirmativa, en el caso de que las fluctuaciones desaparecieran después de la operación. La intervención transcurrió sin dificultades. Josephson y Horowitz identificaron el circuito; yo me encargué de extirpar el punto de entrada. Una vez terminada la intervención, Simson volvió a aplicar su aparato al paciente. Las fluctuaciones que seguían a la QRS habían desaparecido.

Habíamos recorrido un largo camino desde 1978. Entendimos por qué nuestro enfoque quirúrgico, ideado de acuerdo con unas conjeturas lógicas, había resultado eficaz. Corta la vía anatómica enferma que, en respuesta a la descarga aberrante de una célula cercana, genera un flujo repetido de impulsos a través de un circuito recurrente. Y aprendimos a descubrir, mediante una técnica incruenta, qué pacientes se encuentran en situación de riesgo.

En 1984 me trasladé a la Universidad de Colorado. Utilizamos, como una rutina más, la prueba de Simson. Esperamos un par o tres meses, desde el infarto, para asegurarnos de que no se detectaba ninguna predisposición hacia las taquicardias "automáticas". Durante una semana más o menos después del infarto, las células moribundas suelen emitir descargas, cuando deberían permanecer silenciosas. Ese comportamiento puede hacer que el corazón lata antes de tiempo. Si la célula se despolariza repetidamente, la actividad podría conducir a un ritmo rápido del corazón, con resultado a veces de paro. La tendencia hacia la taquicardia automática se resuelve en el curso de unas semanas, conforme van muriendo las células excitadas.

Si se descubre una propensión hacia la taquicardia reentrante después de un adecuado período de espera y la medicación no resolviera el problema, los pacientes pueden considerar otras opciones de tratamiento. Hablo de más de una elección posible porque la cirugía ya no es la única alternativa terapéutica frente a los fármacos. Desde 1980 se cuenta con el desfibrilador implantable: cuando el corazón empieza a latir rápidamente, la máquina emite un fuerte impulso que despolariza instantáneamente todo el corazón, dando al nódulo senoauricular la oportunidad de recuperar su función de marcapasos.

Los que mueren por culpa de las complicaciones provenientes de la implantación del dispositivo no llegan a la mitad de los fallecidos como consecuencia de nuestra intervención quirúrgica. Pero, a diferencia de la operación, el dispositivo es mero paliativo y no cura. Los pacientes implantados siguen teniendo episodios de taquicardia y pueden perder el conocimiento cada vez que reciben el fuerte impulso que les devuelve al ritmo normal. No pueden, pues, conducir un automóvil ni realizar otras actividades en las que una repentina pérdida de consciencia podría ser peligrosa. Si a un paciente se le indica que la mejor forma de acabar con un circuito de reentrada consiste en la intervención quirúrgica, puede estar tranquilo ya que esa medida constituye ahora una práctica habitual en muchos hospitales.

Conviene saber que la mayoría de los pacientes que sobreviven a un infarto no son vulnerables a las arritmias de reentrada. La mitad, tal vez, de los individuos proclives puede beneficiarse de la oportuna medicación. Pero las anomalías eléctricas pueden elevar a un 80 por ciento el número de los que mueran antes de que transcurra un año del primer ataque de taquicardia de reentrada por no responder a los fármacos, si no reciben ningún otro tipo de terapia. El valor de un banquero de Philadelphia posibilitó crear un tratamiento del que se han beneficiado muchísimas personas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

OBSERVATIONS ON MECHANISMS OF VENTRICULAR TACHICARDIA IN MAN. H. J. J. Wellens, D. R. Duren y K. I. Lie en *Circulation*, vol. 54, n.º 2, págs. 237-244; agosto de 1976.

EL TRATAMIENTO METABÓLICO DE LAS ENFERMEDADES DEL CORAZÓN. Demetrio Jodi-Pallares y Miguel González-Ahumada en *Investigación y Ciencia*, n.º 15, págs. 6-15; diciembre de 1977.

SURGICAL ENDOCARDIAL RESECTION FOR THE TREATMENT OF MALIGNANT VENTRICULAR TACHYCARDIA. A. H. Harken, M. E. Josephson y L. N. Horowitz en *Annals of Surgery*, vol. 190, n.º 4, págs. 456-460; octubre de 1979.

CARDIAC ARRHYTHMIAS. A. H. Harken en *Care of the Surgical Patient*, vol. 1: *Critical Care*. Dirigido por D. W. Wilmore, M. F. Brennan, A. H. Harken, J. W. Holcroft y J. L. Meakins. Scientific American Medicine, 1992.

Lógica borrosa

La lógica binaria de los ordenadores actuales no suele bastar a la hora de describir la indefinición del mundo real. La lógica borrosa ofrece algunas posibilidades más atractivas

Bart Kosko y Satoru Isaka

Los ordenadores no funcionan como los cerebros. El "razonar" de un ordenador consiste en manipular hechos precisos, enunciados que por necesidad son o verdaderos o falsos, convertidos en ristras de ceros y unos, mientras que el cerebro humano puede hacerlo con aserciones vagas, afirmaciones inciertas y juicios de valor: "hace fresco", "va deprisa" , "es joven". A los ordenadores les falta el sentido común que nosotros poseemos y que nos permite afrontar un mundo en el que las cosas sólo son parcialmente verdaderas.

La lógica borrosa es una rama de la inteligencia artificial gracias a la cual los ordenadores pueden diluir el blanco y el negro de la lógica ordinaria en los grises con que el sentido común percibe un mundo incierto. Allá por los años veinte empezó a incorporarse a la lógica moderna el concepto en que se funda la borrosa: todo es cuestión de grado.

La lógica borrosa permite manejar conceptos vagos, como puedan serlo "tibio" o "todavía sucio", lo que ayuda a quienes fabrican aparatos como los acondicionadores de aire o las lavadoras, que deben variar su funcionamiento o cambiar de estado en base a criterios de difícil especificación. Cuando los matemáticos carezcan de algoritmos que determinen la respuesta de un sistema a los estímulos que reciba, puede que la lógica borrosa sea capaz de gobernar o de describir el sistema por medio de reglas "de sentido común" que se refieran a cantidades indefinidas. No se conoce ningún modelo matemático capaz de conducir marcha atrás un camión con remolque hasta un muelle de carga desde cualquier lugar de un aparcamiento. Los seres humanos y los sistemas borrosos desarrollan esta tarea de guía no lineal mediante el uso de reglas prácticas, aunque imprecisas, del estilo de "si el remolque se desvía un poco a la izquierda, gira un poco a la derecha". Lo habitual es que los sistemas borrosos utilicen las reglas que formulan los expertos. Si no se dispone de ellas, los sistemas adaptativos las aprenden observando cómo manejan las personas los dispositivos reales.

BART KOSKO y SATORU ISAKA son pioneros en el desarrollo de sistemas lógicos borrosos. Kosko es licenciado en filosofía y económicas, tiene un máster de matemática aplicada y es doctor en ingeniería eléctrica. Es profesor ayudante de ingeniería eléctrica en la Universidad del Sur de California y miembro del consejo de la Sociedad Internacional de Redes Neuronales. Isaka está especializado en el procesamiento de información borrosa en la división de investigación y desarrollo de Omron Advanced Systems, en Santa Clara, California.

Son muchos los productos comerciales, procedentes sobre todo de Japón, que, al utilizar la lógica borrosa, la han popularizado en los últimos años. En 1980, la empresa F. L. Smidth & Company de Copenhague utilizó por primera vez un sistema borroso para supervisar el funcionamiento de un horno de cemento. En 1988, Hitachi le confió el gobierno del metro de Sendai, en Japón, a un sistema de este tipo. Desde entonces, las empresas japonesas han utilizado la lógica borrosa para hacer funcionar cientos de aparatos domésticos y de productos electrónicos. El Ministerio de Comercio Internacional e Industria japonés estimó que el valor de la categoría de productos borrosos en 1992 se acercaba a los dos mil millones de dólares. Las empresas de Estados Unidos y de Europa se encuentran todavía muy lejos de esa cifra.

Las aplicaciones de la lógica borrosa van más allá de los sistemas de control. Teoremas no hace mucho formulados muestran que, en principio, puede servir para modelar cualquier sistema continuo, ya sea de ingeniería, física, biología o economía. Los modelos de sentido común, borrosos, resultan más útiles o fidedignos en muchos campos que los modelos matemáticos normales.

La raíz de la diferencia entre la lógica clásica y la borrosa se halla en lo que Aristóteles llamó la ley del tercio excluso. En la teoría de conjuntos habitual, un objeto cualquiera o bien pertenece a un conjunto o bien no pertenece a él. No hay término medio: el número cinco pertenece por completo al conjunto de los números impares y no pertenece en absoluto al conjunto de los números pares; en los conjuntos bivaluados, un objeto no puede pertenecer al mismo tiempo a un conjunto y a su complemento, o no pertenecer a ninguno de los dos. Este principio preserva la estructura de la lógica y evita la contradicción de que un objeto sea y no sea algo al mismo tiempo.

Los conjuntos borrosos, o multivaluados, violan —en alguna medida— la ley del tercio excluso. A un conjunto borroso sólo se pertenece en parte. Los bordes de los conjuntos normales son abruptos y sus condiciones de pertenencia se representan gráficamente mediante un escalón. La frontera de un conjunto borroso se va difuminando; la condición de pertenencia es una curva. Esta pérdida de nitidez crea contradicciones parciales: el aire puede ser al mismo tiempo fresco, en un veinte por ciento, y no fresco, en un ochenta por ciento.

No es lo mismo un grado borroso que un porcentaje de probabilidad; hay críticos de la lógica borrosa que no se han percatado de ello. Las probabilidades miden en qué medida cabe esperar que suceda o no algo concreto. La borrosidad mide el grado en que algo está sucediendo ya o en el que se está cumpliendo determinada condición. El enunciado "la probabilidad de que mañana haga fresco es del 30 por ciento" expresa una hipótesis sobre si mañana hará fresco o no. Sin embargo, "la maña-

na es un 30 por ciento fresca" significa que el aire de una y la misma mañana es en cierta medida frío y, al mismo tiempo y en distinto grado, templado y cálido.

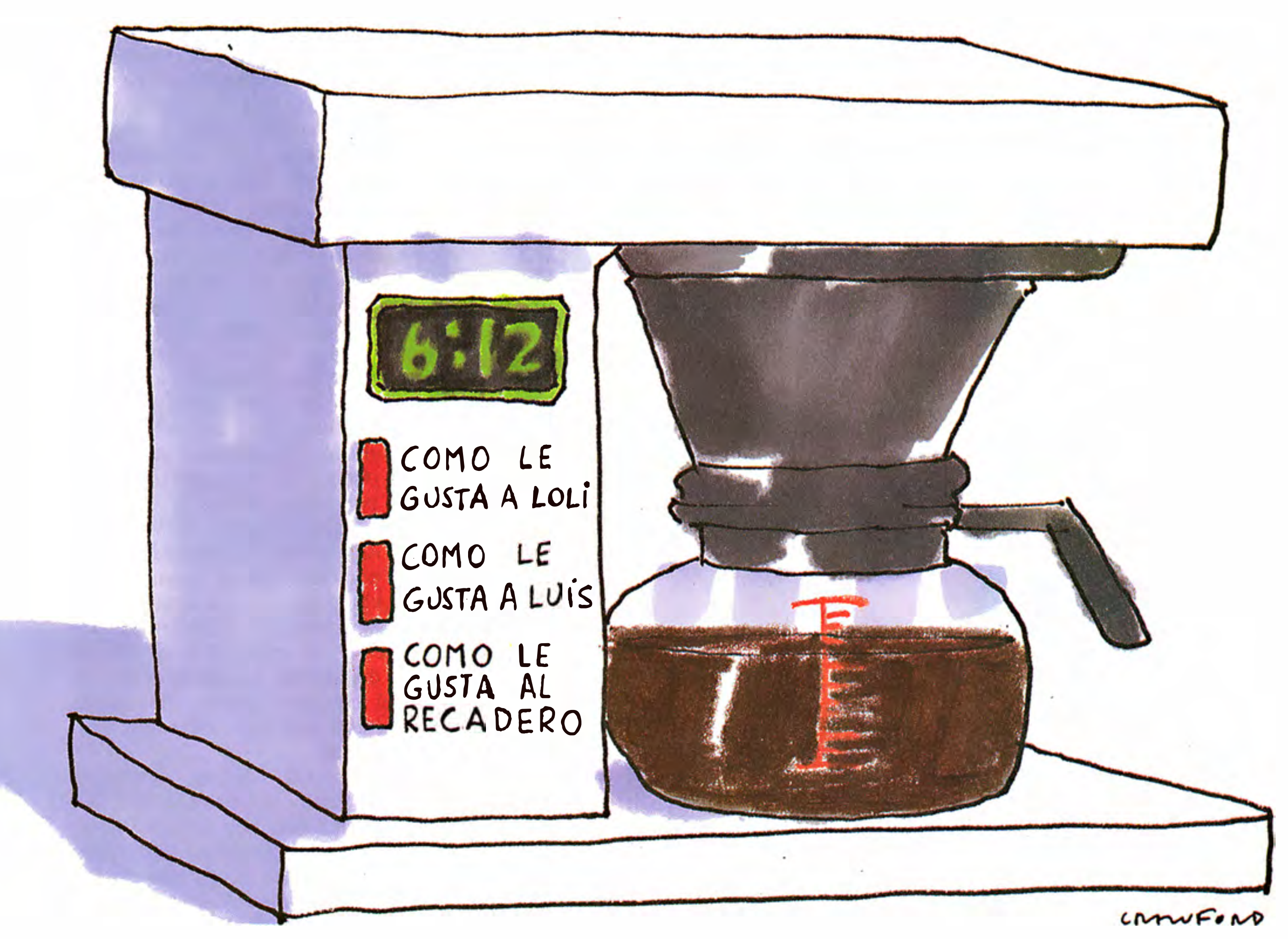
La única restricción impuesta a la lógica borrosa es que los grados de pertenencia de un objeto a conjuntos complementarios deben sumar uno. Si el aire parece fresco en un 20 por ciento, también deberá parecer no fresco en un 80 por ciento. Es así como se sortea la contradicción bivaluada que destruiría toda lógica formal: que algo fuese 100 por cien fresco y 100 por cien no fresco. En lógica borrosa, la ley del tercio excluso vale tan sólo como caso especial: cuando un objeto pertenece al 100 por cien a un grupo.

El estudio moderno de la lógica borrosa y de las contradicciones parciales comenzó a principios de este siglo, cuando Bertrand Russell topó con una vieja paradoja griega en el centro mismo de la teoría de conjuntos y de la lógica modernas. Un cretense —dice este rompecabezas— afirma que todos los cretenses mienten. ¿Miente entonces el cretense? Si miente, está diciendo la verdad y entonces no miente. Si no miente, está diciendo la verdad y entonces miente. Hay una contradicción: el enunciado del cretense resulta a la vez verdadero y falso. Russell se encontró con la misma paradoja en la teoría de conjuntos. El conjunto de todos los conjuntos es un conjunto y, por consiguiente, es miembro de sí mismo. Sin embargo, el conjunto de todas las manzanas no es miembro de sí mismo, porque sus miembros son manzanas y no conjuntos. Russell se preguntó entonces: ¿es el conjunto de todos los conjuntos que no son miembros de sí mismos un miembro de sí mismo? Si lo es, no lo es, y si no lo es, lo es.

Frente a problemas como éstos, la lógica clásica se rinde. La lógica borrosa, en cambio, afirma que la respuesta es medio verdadera y medio falsa; el cretense es en un 50 por ciento mentiroso y en un 50 por ciento veraz. Cuando la pertenencia no llega a ser total, un sistema bivaluado simplifica el problema redondeando por defecto a cero o por exceso a cien; el multivaluado, en cambio, opta por un *mitad y mitad* que equidista de ambos extremos.

El lógico polaco Jan Łukasiewicz desarrolló, en los años veinte de este siglo y con independencia de Russell, los principios de la lógica multivaluada, cuyos enunciados pueden tener valores de verdad fraccionarios, comprendidos entre el cero y el uno de la lógica binaria. En un artículo publicado en la revista *Philosophy of Science* en 1937, el filósofo Max Black aplicó la lógica multivaluada a listas, o conjuntos de objetos, y dibujó las primeras curvas de pertenencia a conjuntos borrosos, a los que Black, siguiendo la guía de Russell, denominó "vagos".

Casi treinta años más tarde, Lofti A. Zadeh, entonces director del departamento de ingeniería eléctrica de la Universidad de California en Berkeley, publicó "Fuzzy Sets [Conjuntos bo-



1. EL OBJETIVO DE QUIENES TRABAJAN en lógica borrosa es construir máquinas que comprendan la indefinición del mundo real. La lógica borrosa puede representar y controlar matices que escapan a la lógica binaria de los ordenadores habituales.

rrosos]", artículo que marcó un hito histórico y proporcionó a la disciplina su nombre. Zadeh aplicó la lógica de Łukasiewicz a todo objeto de un conjunto y desarrolló un álgebra completa para conjuntos borrosos. Con todo, los conjuntos borrosos no tuvieron aplicación práctica hasta mediados de los años setenta, cuando Ebrahim H. Mamdani, del Queen Mary College de Londres, diseñó un controlador borroso para un motor de vapor. Desde entonces, el término "lógica borrosa" se ha asociado a cualquier sistema matemático o de ordenador que se base en los conjuntos borrosos.

La lógica borrosa consta de reglas de la forma "si..., entonces..." que transforman entradas en salidas, un conjunto borroso en otro. El controlador del acondicionador de aire de un coche podría incorporar reglas parecidas a "si la temperatura es baja, que el motor gire despacio" y "si la temperatura es agradable, que gire a media velocidad". Las temperaturas (baja, agradable) y las velocidades (despacio, media) se refieren a conjuntos borrosos y no a valores específicos.

El ingeniero que diseña un sistema borroso puede comenzar por asignarle un conjunto de reglas borrosas establecidas por un experto. Los grados de pertenencia a varios conjuntos de entradas y salidas borrosas se definirían mediante conjuntos de curvas, lo que permite su representación gráfica. Dada la regla "si el aire es frío, que el motor gire despacio", las entradas (temperaturas) se disponen a lo largo de uno de los ejes de la gráfica, y las salidas (velocidades del motor) se representan a lo largo del otro. El producto de estos conjuntos borrosos forma una zona borrosa, que representa el conjunto de todas las asociaciones entre entradas y salidas que la regla establece. Su tamaño refleja la vaguedad o incertidumbre de esta última, haciéndose más pequeña cuanto más preciso sea el conjunto borroso. Si "fresco" es exactamente 20 grados, el conjunto borroso de la temperatura se concentra en un punto. Si los rangos de temperatura y velocidad son muy angostos, la zona determinada por la regla será un punto.

Las reglas de un sistema borroso definen un conjunto de zonas que se solapan y relacionan un dominio completo de entradas con un dominio completo de salidas. En este sentido, el sistema borroso es una aproximación de alguna función o ecuación matemática de causa y efecto, una norma que determinase, por ejemplo, cómo debe ajustar un microprocesador la potencia de un acondicionador de aire o la velocidad de una lavadora en respuesta a un dato recién medido.

Mediante conjuntos borrosos puede aproximarse cualquier función matemática continua. Uno de nosotros (Kosko) probó este teorema de convergencia uniforme al demostrar que se puede cubrir el gráfico de cualquier función o relación entrada-salida con pequeñas zonas borrosas. El teorema garantiza además que podemos fijar de antemano el error máximo de la aproximación con la certeza de que podrá alcanzarse con un número finito de reglas. Un sistema borroso razona, o realiza inferencias, basándose en las zonas generadas por sus reglas. Cuando las zonas se solapan, dos o más reglas pueden transformar cualquier número de entrada en un resultado. Cuando los datos hacen que las reglas actúen, las superficies solapadas se activan en paralelo, pero sólo hasta cierto punto.

Imagínese un acondicionador de aire borroso que cuente con cinco reglas y, por tanto, con cinco zonas, que emparejen temperaturas y velocidades de motor. Los conjuntos de temperatura (fría, fresca, agradable, cálida y tórrida) cubrirán todas las entradas borrosas posibles. Los conjuntos de velocidad de motor (muy lenta, lenta, media, rápida y muy rápida) describirán a su vez todas las salidas borrosas. Una temperatura de, digamos, 20 grados podría ser un veinte por ciento fresca (un ochenta por ciento no fresca), un setenta por ciento agradable (un treinta por ciento no agradable) y un cero por ciento fría, cálida y tórrida. Se activarían así las reglas "si es fría" y "si es agradable", determinando a la vez velocidades de motor lenta y media.

La velocidad final del motor sería un resultado proporcional de ambas reglas. Como la temperatura era un veinte por ciento fresca, la altura de la curva que describe la velocidad lenta del motor disminuirá a un veinte por ciento de su magnitud original; como, además, era un 70 por ciento agradable, el alzado de la curva "media" se reducirá a un 70 por ciento del inicial. La curva definitiva para el conjunto borroso de salidas se obtendrá sumando estas dos curvas reducidas.

En su forma borrosa, semejante curva de salida no es utilizable por los controladores, que actúan sujetos a instrucciones binarias. De modo que el paso final es un proceso de "*desemborronamiento*" que transforma la curva de salida borrosa en un único valor numérico concreto. La técnica más común consiste en cal-

CONJUNTO NO BORROSO

FRESCA

PERTENENCIA (PORCENTAJE)

100

0

10 16 22

TEMPERATURA DEL AIRE

CONJUNTO BORROSO

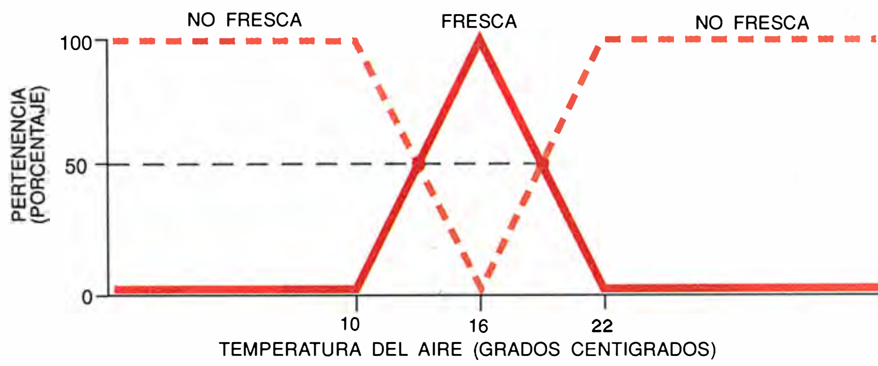
FRESCA

100

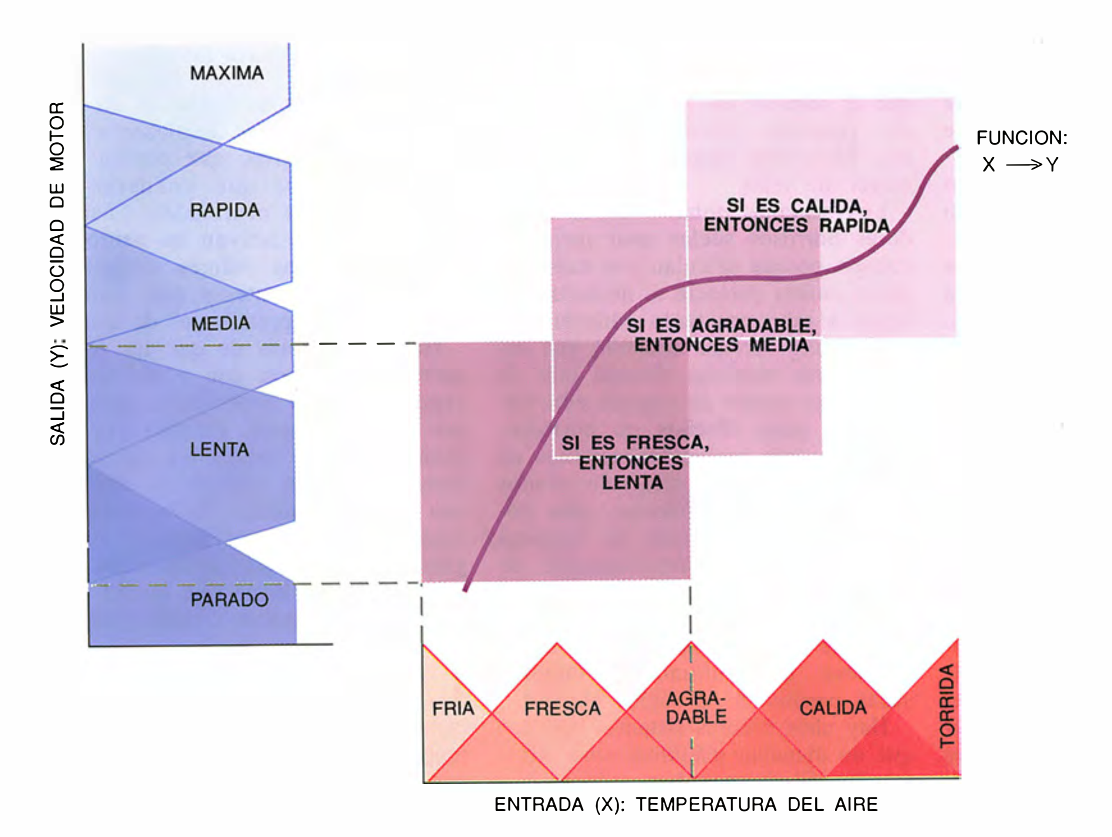
0

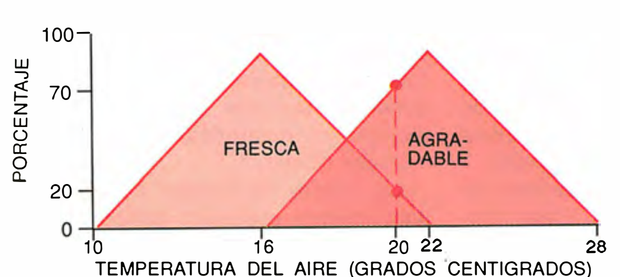
10 16 22

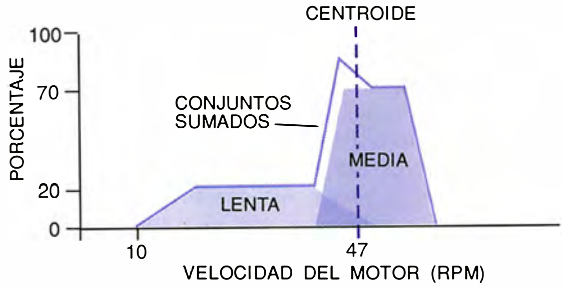
TEMPERATURA DEL AIRE



2. LA TEORIA DE CONJUNTOS subraya la diferencia entre la lógica borrosa y la ordinaria. En ésta, un objeto pertenece por completo a un conjunto o no pertenece a él en absoluto (*arriba, izquierda*). Un objeto pertenece a un conjunto borroso sólo en cierta medida (*arriba, derecha*) y a su complemento en otra cierta medida. Estas pertenencias parciales deben sumar uno (*abajo*). Si 13 grados es en un 50 por ciento una temperatura "fresca", será también en un 50 por ciento "no fresca".







3. LA APLICACION DE LA LOGICA BORROSA al control de un acondicionador de aire muestra cómo pueden producirse resultados precisos con conjuntos vagos. El acondicionador mide la temperatura del aire y calcula la velocidad apropiada del motor, usando reglas que asocian conjuntos borrosos de temperaturas, como "fresca", a otros similares de velocidades, por ejemplo, "lenta". Cada regla forma una zona borrosa y una serie de ellas sirve como aproximación de una curva de actuación o de cualquier otra función. Si se considera que una temperatura de 20 grados es un 20 por ciento "fresca" y un 70 por ciento "agradable", se activan dos reglas y el sistema intenta hacer funcionar el motor a una velocidad que es un 20 por ciento "lenta" y un 70 por ciento "media" (*abajo, derecha*). La velocidad exacta se obtiene hallando el centro de masa, o centroide, para la suma de las curvas de salida que representan el régimen del motor.

cular el centro de masas, o centroide, del área que encierra la curva. En nuestro ejemplo, el centroide de la curva de salida borrosa correspondería a una velocidad de motor de 47 revoluciones por minuto. De esta manera, partiendo de una entrada cuantitativa de temperatura, el controlador electrónico se sirve de conjuntos borrosos de temperatura y velocidad de motor para "razonar" y obtener una salida de velocidad apropiada y precisa.

Todos los sistemas borrosos utilizan esta técnica de "activar y sumar" u otra por el estilo. Cuando se hacen más complejos, los antecedentes de las reglas pueden incluir cierto número de términos relacionados por la conjunción "y" o por la disyunción "o". Un acondicionador de aire de borrosidad avanzada podría basarse en reglas parecidas a ésta: "Si el aire es fresco y la humedad es alta, haz que el motor gire a velocidad media."

Los productos borrosos usan microprocesadores que ejecutan algoritmos borrosos de inferencia junto a sensores que miden condiciones de entrada variables. Las pastillas (*chips*) borrosas son microprocesadores diseñados para almacenar y procesar reglas borrosas. En 1985, Masaki Togai y Hiroyuki Watanabe, que entonces trabajaban en los Laboratorios AT&T Bell, produjeron el primer circuito digital borroso; procesaba dieciséis reglas simples en 12,5 microsegundos, o sea, 0,08 millones de inferencias lógicas borrosas por segundo. Togai Infralogic, Inc. ofrece en estos momentos circuitos cuyo soporte material es el llamado "de aceleración computacional borrosa" y que procesan hasta dos millones de reglas por segundo. La mayoría de las empresas de microprocesadores han emprendido proyectos de investigación de circuitos borrosos, aunque los productos comerciales dependen en gran medida de microprocesadores corrientes que los ingenieros programan con unas pocas líneas de código de inferencia borrosa. Así el mercado de pastillas específicamente diseñadas para la lógica borrosa es todavía exiguo, pero el valor de los microprocesadores que la incorporan ya sobrepasa los mil millones de dólares.

La aplicación más famosa de la lógica borrosa es el controlador del metro de Sendai, que funciona mejor que los operadores humanos y que los controladores automáticos convencionales. Estos últimos hacen que el tren arranque o se detenga al dictado de marcadores de posición que determinan cuán lejos está el vehículo de una estación. Su programación rígida puede hacer que el viaje sea agitado: aplicarán siempre la misma presión de frenado cuando el tren esté a, digamos, cien metros de la estación, con independencia de que vaya cuesta arriba o cuesta abajo.

A mediados de los años ochenta, los ingenieros de Hitachi hicieron uso de reglas borrosas para acelerar, decelerar y frenar los trenes con mayor suavidad que el mejor operario humano. Las reglas comprendían un amplio dominio de variables relativas a la actividad reciente del tren, como, por ejemplo, la frecuencia y magnitud de los cambios de velocidad o la proximidad de la velocidad real a la máxima. En pruebas simuladas, el controlador borroso superó a otro automático en comodidad de los viajeros y brevedad del trayecto, e incluso redujo en un diez por ciento el consumo de energía del tren. En la actualidad el sistema borroso dirige el metro de Sendai durante las horas punta, así como algunos trenes de Tokio, mientras que son personas quienes conducen durante el resto de la jornada, para evitar que olviden cómo se hace.

Diversas empresas japonesas y coreanas construyen una serie de bienes de consumo borrosos, dotados de un control más preciso que los corrientes. Las lavadoras borrosas ajustan el ciclo de lavado a la colada, modificando su plan a medida que la limpieza progresa. Una tal lavadora lava mejor que una máquina "boba", de órdenes fijas. En la más simple, un sensor óptico mide la turbiedad o claridad del agua de lavado, y el controlador estima el tiempo necesario para disolver una mancha. Algunas máquinas usan un sensor de carga, que efectúa cambios en la tasa de agitación o en la temperatura del agua; otras introducen burbujas para facilitar la disolución del detergente y de la suciedad. Con no más de diez reglas borrosas, la lavadora puede exhibir una notable variedad de comportamiento.

En cámaras y videocámaras, la lógica borrosa asocia datos de las imágenes a diversos ajustes de las lentes. El auto-enfoque de una de las primeras videocámaras borrosas, la Canon H800, disponible desde 1990, actúa mediante trece reglas borrosas. Para anular la inestabilidad de imagen que el temblor de la mano causa en sus pequeñas videocámaras Panasonic, Matsushita recurre a un número mayor de ellas.

Los sistemas dotados de controladores borrosos suelen usar mejor la energía porque calculan con más precisión cuánta potencia se necesita para llevar a cabo una tarea. Mitsubishi y la Samsung coreana declaran que sus aspiradoras borrosas ahorran más de un 40 por ciento de energía con respecto a otros diseños no borrosos, gracias a que miden los cambios en el flujo de polvo mediante diodos emisores de luz infrarroja, para poder determinar el grado de limpieza del suelo; un microprocesador de cuatro bits calcula entonces la potencia de succión apropiada y otros parámetros de funcionamiento de la aspiradora. Los automóviles también sacan partido de la lógica borrosa.

Hay unos cuantos sistemas borrosos que no manejan máquinas sino información. El del conglomerado empresarial japonés Omron supervisa con reglas lógicas borrosas cinco bases de datos médicos pertenecientes a un sistema de gestión sanitaria para grandes empresas. Se usan quinientas reglas para diagnosticar la salud de unos 10.000 pacientes y elaborar planes individuales que les ayuden a prevenir enfermedades, mantenerse en forma y reducir el estrés. Otras empresas, entre ellas Hitachi y Yamaichi Securities, han diseñado programas que gestionan títulos bursátiles, para lo que emplean reglas sensibles a los cambios que experimentan los datos económicos.

Las reglas de un sistema borroso son su talón de Aquiles. Casi todos los productos comercialmente disponibles se basan en reglas confeccionadas por expertos, que los ingenieros someten luego a un largo proceso de afinación, referido también a los conjuntos borrosos. Se intenta automatizarlo construyendo sistemas adaptativos basados en redes neuronales artificiales u otras herramientas estadísticas, que afinen, o incluso formulen, las reglas iniciales.

Las redes neuronales son colecciones de "neuronas" y "sinapsis" que modifican sus valores en respuesta a estímulos procedentes de sinapsis y neuronas circundantes. La red neuronal actúa como un ordenador, pues de las entradas que recibe deriva salidas. Las neuronas y las sinapsis pueden ser componentes de silicio o ecuaciones escritas en un soporte lógico que simulen el comportamiento de aquéllas. Una neurona suma todas las señales de entrada procedentes de otras neuronas y emite entonces su propia respuesta en forma de un número. Las señales se desplazan a través de las sinapsis, que poseen valores numéricos que ponderan el flujo de señales neuronales. Cuando nuevas entradas activan las neuronas de una red, los valores sinápticos cambian ligeramente, y este cambio constituye el "aprendizaje" de la red.

Hay dos formas de que las redes aprendan patrones, con y sin supervisión. Una red supervisada aprende por ensayo y error, dirigida por un profesor, que le señala las equivocaciones, es decir, cuándo ha emitido una salida que difiere de la respuesta deseada. El profesor seguirá corrigiendo las respuestas dadas a los datos de muestra hasta que la red responda correctamente a todos ellos.

Las redes supervisadas afinan las reglas de un sistema borroso como si fueran sinapsis. El usuario proporciona el conjunto de reglas inicial. La red neuronal lo afina respondiendo a cientos de miles de entradas, modificando ligera y repetidamente los conjuntos borrosos y observando cómo actúa el sistema tras cada alteración. Este proceso tiende a mantener los cambios que mejoran el rendimiento y a desestimar los demás.

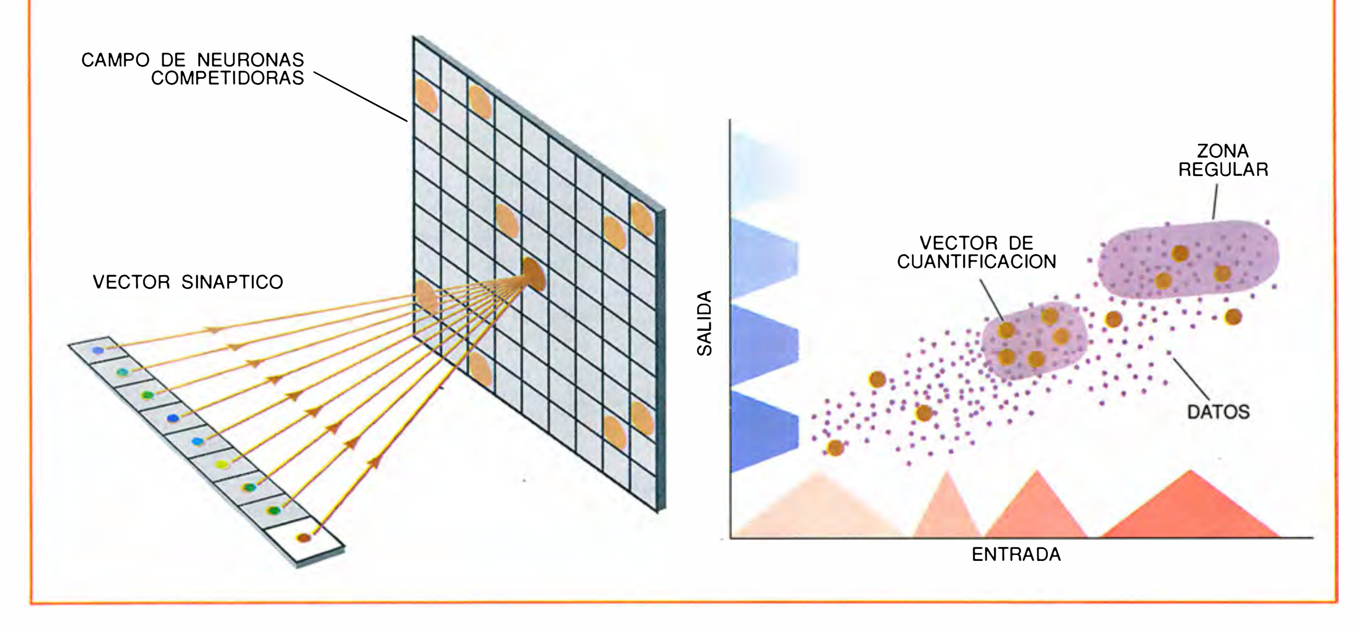
Las reglas de control borrosas de unos cuantos productos japoneses —el horno de microondas de Sanyo, lavadoras de distintos fabricantes— se han afinado mediante el aprendizaje neuronal supervisado. Sharp recurre a él para modificar las de su refrigerador borroso y que el aparato aprenda la frecuencia con que su propietario suele abrir la puerta, para luego ajustar el ciclo de enfriamiento en consonancia. Hasta ahora su red neuronal se ha instruido "desconectada", en el laboratorio, con pequeñas muestras del comportamiento de clientes promedio.

Las redes supervisadas tienen sus inconvenientes. Afinarlas puede llevar horas o días de tiempo de ordenador; además puede que la solución o regla a que converjan sea inapropiada, y hasta puede que no converjan en absoluto. Se han propuesto cientos de esquemas para aliviar el problema, pero ninguno lo ha resuelto. Incluso tras una larga sesión de afinación, las reglas finales pueden no ser mucho mejores que las iniciales.

Las redes neuronales no supervisadas no aprenden, como las anteriores, gracias a un experto que suministra los datos y, además, hace correcciones durante el proceso; lo

Cómo aprenden reglas los sistemas borrosos

Las redes neuronales son sistemas adaptativos con los que se puede dotar de reglas a los sistemas borrosos. Una red neuronal recibe pares de datos de entrada y salida —temperaturas y velocidades de motor de un acondicionador de aire, por ejemplo— y los agrupa en unos pocos prototipos, o clases. Dentro de la red, cada prototipo actúa como un vector de cuantificación —una lista de números— que representa las sinapsis que suministran información a una neurona. Cuando se introduce un dato nuevo en la red, se estimula la neurona asociada con el prototipo que case mejor con él. Los valores de las sinapsis "ganadoras" se ajustan para reflejar los datos que están recibiendo. Conforme los datos se agrupan, también se agrupan los vectores de cuantificación, que definen las zonas regulares. El aumento de los datos conduce a zonas más numerosas y precisas.



hacen más bien observando las decisiones que toma el experto. Un sistema borroso adaptativo aprende así a reconocer patrones regulares en los datos de entrada. Se necesitan pocas entradas para que se formen con rapidez vastas zonas regulares, que posteriormente se afinan.

Las redes neuronales no supervisadas se limitan a acumular los datos en grupos cuyos miembros son parecidos, aunque no se le indiquen la respuesta correcta ni las incorrectas, ni forma alguna de organizarlos. Los algoritmos son más sencillos y, al menos en teoría, la red sólo necesita procesar los datos una vez (aunque, si son escasos, tendrá que hacerlo más veces). Por tanto, este tipo de aprendizaje es mucho más rápido que el supervisado. Con entradas y salidas numéricas suministradas por un experto, por un proceso físico o hasta por un algoritmo, una red neuronal no supervisada puede hallar el conjunto de reglas inicial de un sistema borroso. La calidad de las reglas dependerá de la calidad de los datos y, en consecuencia, del buen hacer del experto que los genere. En este momento, hay menos sistemas borrosos adaptativos no supervisados que supervisados. Dado que las redes no supervisadas destacan en la creación de reglas y las supervisadas en su afinación, hay sistemas borrosos adaptativos híbridos que incluyen a ambas.

Los sistemas hasta ahora diseñados son en su mayoría sistemas de control con pocas variables. La razón es que los primeros ingenieros que se dedicaron a la lógica borrosa eran teóricos del control y que, además, un bucle de control regula la mayoría de los productos de consumo. La próxima generación de investigadores de la lógica borrosa habrá de abordar sistemas no lineales a gran escala con múltiples variables, necesarios si se intenta supervisar plantas de producción u horarios de vuelo de líneas aéreas, o al tratar de crear modelos de la economía. Quizá no haya expertos capaces de describir sistemas de ese calibre y el sentido común puede que titubee o no sea aplicable. Las redes neuronales que tengan que aprender las reglas necesarias para generar modelos de problemas como ésos contarán con pocos datos orientativos.

Otro problema adicional es que, como les pasa a otros modelos matemáticos o informáticos, la lógica borrosa es presa de la "maldición de la dimensionalidad": el número de reglas tiende a crecer exponencialmente cuando el número de variables del sistema aumenta. Los sistemas borrosos deben aceptar un toma y daca. Si las zonas regulares son grandes, el sistema será más manejable, pero también menos preciso. Aun con esta limitación, no es raro que la lógica borrosa cree mejores modelos de la vaguedad del mundo circundante que el "blanco y negro" de la teoría de conjuntos, siendo perfectamente posible que los sistemas lógicos borrosos se abran paso en un número cada vez mayor de ordenadores, aparatos domésticos y modelos teóricos. Puede que el siglo que viene sea más borroso de lo que pensamos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

VAGUENESS: AN EXERCISE IN LOGICAL ANALYSIS. Max Black en *Philosophy of Science*, vol. 4, n.º 4, páginas 427-455; octubre de 1937.

FUZZY SETS AND APPLICATIONS: SELECTED PAPERS BY L. A. ZADEH. Dirigido por R. R. Yager y otros. Wiley-Interscience, 1987.

NEURAL NETWORKS AND FUZZY SYSTEMS. Bart Kosko. Prentice-Hall, 1991.

PROGRESS IN SUPERVISED NEURAL NETWORKS. Don R. Hush y Bill G. Horne en *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 10, n.º 1, páginas 8-39; enero de 1993.

Un asentamiento antiguo en Licia

En el marco de un proyecto histórico-arqueológico internacional e interdisciplinario se investiga y reconstruye sistemáticamente la historia de la polis de Kyaneai y de su territorio, situados al sur de Anatolia

Frank Kolb

El 20 de agosto de 1991, mi colaborador Andreas "Sperber" Thomsen descubrió cerca de la aldea turca de Yavu una notable instalación, sin duda muy antigua: unas gradas, situadas a cinco metros de profundidad, orientadas al sur y recubiertas por una cisterna moderna, que conducen a una fuente; ésta mana por encima de un tronco de árbol empotrado en un muro de piedra. El muro frontero a las gradas está construido con sillares superpuestos, magníficamente trabajados, y es posible que perteneciera al podio de un templo.

Esta construcción, demasiado lujosa para una fuente normal, podría contener los restos de un "oráculo de manantial" dedicado a Apolo, oráculo que tuvo cierta importancia para la región de Licia, situada en Asia Menor, y que fue descrito en el siglo II por el griego Pausanias, escritor y viajero. El lugar donde se realizó el hallazgo se encuentra en el llano situado bajo la acrópolis de la antigua ciudad de Kyaneai. Las excavaciones proporcionarán con toda seguridad datos más precisos.

Pero las excavaciones se realizarán, en todo caso, una vez estén acabadas las investigaciones de que se da cuenta en este artículo. No se pretende con ellas hallar edificaciones o localidades espectaculares, sino explorar de manera exhaustiva un área de asentamientos: el gran territorio, de unos 120 kilómetros cuadrados de extensión, de la polis de Kyaneai. Por vez primera se investiga así de manera completa una comunidad de la Antigüedad.

¿Por qué hemos elegido para ello precisamente esta región, que sólo de manera fugaz y muy raras veces se menciona en la literatura de la Antigüedad? Una razón esencial es la conservación extraordinariamente buena de los restos de asentamientos antiguos y bizantinos, debida a la situación marginal que caracterizó a esta región tanto en el aspecto político y militar como en el de la historia de la cultura.

Frank Kolb, doctorado en 1970 en la Universidad de Bonn, es catedrático de historia antigua de la Universidad de Tubinga.

Geografía e historia

La región que estamos investigando se encuentra en Licia, una península montañosa que se adentra en el Mediterráneo y que se halla al suroeste de Turquía. La parte central de Licia, entre Telmessos al oeste y Rhodiapolis al este, es una zona salvaje y romántica, que sólo en algunos lugares resulta apta para los asentamientos humanos. Unicamente en las desembocaduras de los grandes ríos se han formado fértiles llanuras de aluvión. En los demás sitios —si se prescinde de la llanura de Elmali, situada al norte y que no pertenece a la zona central de Licia— el terreno cultivable se reduce a ciertas llanuras fértiles, llamadas *ovas*, que aparecen de manera dispersa entre colinas o montes.

Sólo en esos llanos se han encontrado hasta ahora vestigios prehistóricos importantes, que se remontan hasta el tercer milenio antes de Cristo. En la zona de Licia próxima a la costa, en cambio, los más antiguos restos de cerámica datan, según el estado actual de las investigaciones, del siglo VIII antes de Cristo, es decir, de la época en que por primera vez se menciona claramente a los licios en un texto, en la *Ilíada* de Homero.

Las etapas históricas posteriores que conocemos son la fundación de colonias griegas dependientes de Rodas en el siglo VII, sobre todo en el este de Licia, y la conquista de la región por los persas a mediados del siglo VI. El contacto con la civilización griega hizo que los licios comenzasen a manifestar sus peculiaridades étnicas y culturales en la escritura, la escultura y la arquitectura: desde finales del siglo VI adaptaron el alfabeto griego para desarrollar una escritura propia; lo mismo hicieron con formas artísticas y arquitectónicas griegas e iranias para expresar su religiosidad y su ideología política. El dominio temporal de la liga marítima ático-delia (una unión de Estados griegos bajo el mando de Atenas, que existió entre el 477 y el 404) sobre ciertas partes de Licia reforzó las mencionadas influencias.

Pero los licios conservaron también su tradición autóctona: de ello dan testimonio el paso de la arquitectura en madera a la arquitectura en piedra, la configuración especial de sus sepulcros excavados en la roca, las formas de las tapas de los sarcófagos, parecidas a arcos góticos, así como su idioma, sólo en parte descifrado, que pertenece a la familia lingüística luvita y que demuestra que los licios son un pueblo anatólico.

Tanto el ordenamiento político como las estructuras de asentamiento de la época clásica se hallan aún envueltos en bastante oscuridad; son muchos los detalles que indican que existieron simultánea y sucesivamente comunidades autónomas y dominios de jefes locales (dinastas). Xanthos y sus dinastas parecen haber tenido un papel destacado en los siglos V y IV.

La conquista de Licia por Alejandro Magno (realizada entre el 356 y el 323) la integró completamente en la cultura griega, pero a la vez tuvo como consecuencia una amplia remodelación política y social. El idioma licio fue reemplazado enteramente, como lengua de escritura, por el griego, y los dominios de los dinastas dejaron paso a comunidades que

se desarrollaron de acuerdo con el patrón de la polis griega. Una liga de comunidades licias, que tal vez se constituyó en conflicto con las grandes potencias helenísticas —especialmente con la marítima de Rodas— y que estaba dotada de una constitución de tipo representativo, determinó básicamente la política de la región, lo más tarde desde el año 200 antes de Cristo. Pronto tuvo que habérselas con Roma, hasta quedar sometida a ella. Sin embargo, hasta el año 43 después de Cristo no se convirtió Licia en provincia romana.

El desarrollo de Licia en la época helenística y romana está caracterizado por una tendencia a la absorción de las pequeñas comunidades por formaciones políticas y sociales más amplias, así como por una cierta concentración de los procesos de urbanización. En su conjunto, sin embargo, hubo en la región, hasta finales de la Antigüedad, una distribución dispersa de la población; numerosos centros pequeños y medianos, y unos cuantos importantes, controlaban áreas de asentamiento limitadas. Desde los siglos IV y V la Iglesia cristiana se estableció en los lugares principales, creando en ellos sedes episcopales.

Cuestiones no resueltas e investigaciones previas

Aunque nos es posible trazar en sus grandes líneas la historia de esta región y de su poblamiento, aún están por resolver cuestiones esenciales, para no hablar de problemas de detalle. Por un lado, numerosos asentamientos de Licia, cuyos nombres antiguos a menudo desconocemos, aún no han sido investigados completamente; por otro, todavía están por aclarar problemas generales de los asentamientos en la Antigüedad, incluidos los del sur de Asia Menor.

Así, hasta ahora no se sabía nada del aspecto externo que ofrecían los tipos de asentamiento rural de Anatolia (por ejemplo, los *komai*, aldeas), de mención frecuente en las fuentes de la época. Incluso una cuestión tan esencial como la de la vivienda de los campesinos en la Antigüedad es objeto de controversia: ¿habitaban principalmente en centros urbanos y cultivaban desde allí el campo cercano a la ciudad, o bien lo hacían desde granjas situadas en el territorio de la polis? No están mejor las cosas en lo relativo a nuestros conocimientos de estructuras más complejas, como la jerarquía de los asentamientos, la relación campo-ciudad, las redes de comunicación, la función comercial de las aldeas o las formas de cultivo de la tierra. La única forma de aclarar estos problemas es realizar detalladas investigaciones de campo, pues en las fuentes escritas casi no se encuentra nada al respecto.

Licia resulta especialmente apropiada para llevar a cabo este tipo de investigaciones, pues tuvo una posición histórico-política marginal no sólo en la Antigüedad, sino mucho más aún a partir de su conquista por los pueblos turcos seléucidas y otomanos en los siglos XII o XIII. Es evidente que desde entonces se abandonaron muchas zonas de la región, que pasaron a ser utilizadas por nómadas.



1. LA REGION CENTRAL DE LICIA, en otros tiempos densamente poblada, puede que fuese habitada sólo por nómadas desde los siglos XII o XIII hasta el XIX. Por ello se han conservado magníficamente muchos de los numerosos restos de asentamientos de la cultura anterior. El territorio de la polis de Kyaneai atestigua una civilización otrora floreciente. Un grupo internacional está realizando una prospección intensiva de la superficie del terreno con el fin de reconstruir la historia de su poblamiento desde la Antigüedad hasta la Edad Media. Esta ilustración muestra una vista de la necrópolis situada al suroeste de Kyaneai, con sarcófagos de la época imperial romana en estilo típicamente licio.



2. ESTAS GRADAS ANTIGUAS, situadas en una cisterna moderna, pudieron pertenecer a un "oráculo de manantial" descrito en el siglo II después de Cristo por el escritor griego Pausanias. Sólo la prospección completa del terreno permite hallazgos como éste.

En el territorio de Kyaneai, por ejemplo, todavía a mediados del siglo XIX los exploradores encontraron en muchos lugares campamentos de tiendas. Y allí donde se crearon poco después aldeas estables, sus construcciones fueron muy modestas hasta el día de hoy; sólo en pequeña medida se utilizaron para ellas piedras tomadas de las cercanas ruinas antiguas. Este hiato en la continuidad de los asentamientos, que dura aproximadamente desde el siglo XII al XIX, ha hecho que el aspecto de los asentamientos de las épocas bizantina y antigua se haya conservado bastante intacto, si bien los muros de los edificios se han derrumbado en su mayor parte.

Otra ventaja de la región de Kyaneai para la investigación de campo es su muy clara delimitación geográfica. La zona montañosa de Yavu (que lleva el nombre de la aldea turca más importante de la región) se alza como un bloque macizo, al noroeste, sobre el valle de Lasaba, y al noreste, sobre la hoz del río Demre. Hacia el sur la frontera del territorio corría seguramente a lo largo de la sierra más elevada, anterior al declive del terreno hacia el mar. Pertenecía además a la polis de Kyaneai una estrecha franja que servía de acceso al puerto de Teimiussa.

En esta zona árida, cubierta de colinas, con algunas llanuras fértiles, casi siempre pequeñas, la polis de Kyaneai, que en línea recta dista del mar unos seis kilómetros, fue en las épocas helenística, romana y bizantina el centro dominante de los asentamientos, mientras que en la época clásica aún existían otros lugares de igual categoría que ella, como Korba al norte, Trysa al este, Hoyran al sureste, Avsar Tepesi al suroeste y Tüse al oeste. Estos grandes núcleos ya fueron visitados en parte por exploradores ingleses, austriacos y alemanes en el siglo XIX, desde el momento en que, aproximadamente a partir de 1800, se despertó el interés por la costa sur de Turquía gracias al descubrimiento de los importantes monumentos y edificios de Xanthos.

En los años ochenta del siglo pasado una expedición austriaca emprendió una búsqueda sistemática de inscripciones antiguas, que incluyó la zona de Kyaneai, y transportó a Viena los relieves magníficamente conservados del *heroon* de Trysa (el santuario-sepultura de un dinasta de aquel lugar). Pero estos eruditos exploradores dejaron sólo descripciones muy fugaces e incompletas incluso de asentamientos importantes de la región: entonces no interesaban los problemas de la geografía de los mismos; sólo se buscaban inscripciones y tesoros artísticos.

Tras una interrupción causada por las dos guerras mundiales, la exploración de Licia se reinició con las excavaciones francesas en Xanthos, ahora con una finalidad rigurosamente científica. Siguieron luego, a partir de los años sesenta, excavaciones turcas, por ejemplo en Arykanda, Phaselis y Patara, así como otras austriacas en Limyra. Las investigaciones de campo, de distinta intensidad y finalidad, algunas aún en marcha, se ciñen a centros de asentamiento sueltos, así como a tipos de construcción y a clases de monumentos (sepulcros, iglesias, relieves e inscripciones), pero sólo en el caso de los lugares de Tyriaion y Balbura, situados al norte de Licia, tienen como objeto un área de asentamientos o partes de ella.

El método

Nuestra investigación del territorio de Kyaneai se propone realizar un registro completo de todos los restos de asentamientos. Por ello prospectamos sistemáticamente la totalidad del terreno en grupos de tres a cinco personas, que mantienen entre sí una distancia de entre 20 y 30 metros. Así no puede pasársenos por alto ningún resto de asentamiento de alguna importancia.

Este método de prospección intensiva se diferencia del método del *survey* (tal es el término técnico inglés que se ha adoptado para designar la exploración de la superficie), que es el que se usa corrientemente; en el *survey* se exploran sistemáticamente sólo determinadas franjas escogidas de un territorio.

Entre arqueólogos e historiadores hay vivas discusiones sobre cuál de esos dos métodos es el mejor. En todo caso, las prácticas de *survey* empleadas hasta el momento en el ámbito del mundo antiguo han sido muy diversas. Sería un método bueno si viniera determinado por las condiciones concretas del terreno, por los vestigios y por las dimensiones del territorio. Pero a menudo la decisión de qué hacer viene impuesta por las escaseces financieras, las posibilidades de trabajo otorgadas por el país anfitrión o los límites de los



3. LICIA, en el suroeste de Asia Menor (*izquierda*), queda relativamente aislada, y por ello tuvo en la Antigüedad una escasa importancia estratégica. Licia central (*derecha*) fue dominada, quizá desde los primeros tiempos de la época

propios planteamientos; los hallazgos son, en consecuencia, fragmentarios y los resultados científicos carecen de representatividad. A menudo, por ejemplo, el empeño en esclarecer estructuras generales ha impedido ver la importancia que tiene la individualidad también en el ámbito de la historia de los asentamientos.

La prospección superficial selectiva es defendible cuando apenas existen, o ya no existen en absoluto, restos de edificaciones sobre la superficie del terreno, y son únicamente los restos pequeños —sobre todo de cerámica— los que han de proporcionar las informaciones esenciales sobre los asentamientos de una región; es lo que ocurre, por ejemplo, con las investigaciones británicas en Beocia (véase "Arqueología sin excavación", por A. M. Snodgrass y J. L. Bintliff; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1991). En tales casos, lo único que puede explorarse es el número, extensión y duración de los asentamientos, pero no los detalles de su función y de su historia. Una prospección superficial selectiva puede ser suficiente también en terrenos abarcables con la vista, sobre todo en zonas desérticas y esteparias, o en una región de agricultura intensiva, donde es posible distinguir por la fotografía aérea los restos de asentamientos, o bien éstos se encuentran ya señalados hace tiempo, merced a una exploración completa. Pero en zonas difícilmente abarcables con la vista, montañosas, cubiertas de una vegetación espesa, apenas cultivadas y muy poco pobladas, cuyos restos antiguos sean poco conocidos, semejante método provoca inevitablemente omisiones e interpretaciones erróneas.

En no pocas regiones del mundo griego, especialmente de Anatolia, son precisamente ésas las condiciones con que nos encontramos. Esto ocurre de manera casi general en Licia, y especialmente en la región que nosotros estamos explorando.



helenística, por el centro regional de Kyaneai, que adquirió entonces la fisonomía de una polis griega. Los nombres griegos de los lugares, en la medida en que son conocidos, van en letras mayúsculas.



4. EL RELIEVE de este sarcófago de comienzos del siglo IV antes de Cristo, que procede de Kyaneai, muestra probablemente una escena de la mitología griega. Incluso después de la cristianización del país, la forma del sarcófago se atuvo a la tradición licia, transmitida cuando menos desde la época clásica.

Condiciones de investigación y hallazgos

El territorio montañoso de Yavu está deforestado, devastado y es árido; eso no se debe tanto a una rigurosa tala de árboles cuanto al modo de vida nómada de la población en la época posbizantina. Las terrazas de cultivo construidas anteriormente dejaron de trabajarse y las cabras devoraron los árboles jóvenes. De ese modo las faldas de los montes se erosionaron; la tierra fue arrastrada a llanuras situadas a menor altura, donde ha recubierto hasta tal punto el nivel del suelo existente en la Antigüedad que ya ni siquiera el arado saca a la superficie fragmentos cerámicos.

Es muy probable, de todos modos, que estas *ovas* fértiles no estuvieran pobladas en la Antigüedad; las aldeas y las villas rústicas estaban situadas en sus márgenes, sobre terrazas naturales, o bien en las faldas o en las cumbres de los montes, de manera que fuese posible aprovechar cada palmo de tierra cultivable. Y por las colinas peladas, de rocas escarpadas y vivas aristas, se ha extendido un matorral espinoso, que puede alcanzar la altura de un hombre y tener la espesura de una selva virgen. Allí tampoco podía buscarse, por tanto, cerámica. La encontramos únicamente en los alrededores inmediatos de restos de asentamientos, donde la vegetación suele ser más rala.

Tratar de averiguar las condiciones de asentamiento mediante los pequeños restos concentrados en la superficie habría carecido, por tanto, de sentido. Y en la prospección superficial selectiva es de suponer que lo que se hubiera investigado habrían sido las llanuras fértiles, sus márgenes y la parte inferior de las colinas, así como también, pero sólo a modo de prueba, algunas cumbres de éstas. Es cierto que de esa manera se habría descubierto una serie de asentamientos y villas campesinas, y extraído conclusiones sobre la densidad de los asentamientos de las áreas cercanas a las *ovas*; pero habrían escapado a la inspección restos esenciales y sorprendentes, que documentan un denso poblamiento también de las crestas de montes y colinas.

En cambio, nuestro método sistemático intensivo y la exploración de todos los restos de asentamientos nos han permitido descubrir que sobre el terreno rocoso aparecen una y otra vez, acá y allá, *ovas*, muchas veces cubiertas de maleza, que en la Antigüedad ofrecieron terreno suficiente para granjas y pequeños asentamientos. Nuestros hallazgos resultan importantes para la geografía política, por ejemplo, o para la caracterización histórica específica de la zona, como los relativos a la índole de los santuarios, rasgos que distinguen el trabajo del historiador del propio de las ciencias estructurales.

Uno de estos hallazgos es un asentamiento en un espacio rocoso, de la época clásica, oculto en la cumbre de una colina, con un templo situado un poco más abajo en la falda, cuyo altar está excavado en la roca. Este santuario rural, del siglo V o IV antes de Cristo, es el templo más antiguo de planta griega hallado hasta ahora en Licia.

Sólo gracias a esta prospección completa del área de investigación fue posible descubrir la fortificación de época clásica situada en la cumbre de una colina frente a la aldea turca de Büyük Çerler; sus murallas, en número de cuatro, están orientadas hacia el oeste, contra la fortaleza de Tüse, también de época clásica. La gran residencia señorial licia escondida en Avsar Tepesi, zona densamente arbolada —y que es, con la de Tüse, la más importante residencia señorial de nuestra zona, al menos por lo que se refiere a la superficie de su asentamiento—, era completamente desconocida hasta ahora, pese a que sus muros de fortificación tienen en ocasiones seis metros de altura. Es muy probable, por lo demás, que en un *survey* selectivo se hubiesen pasado por alto la pequeña fortificación situada al sur de Korba, que aseguraba contra Kyaneai los terrenos adelantados de esta residencia de dinastas, así como el fuerte que cierra un desfiladero y que está situado a 1,5 kilómetros aproximadamente al norte de Tüse, y también los dos castillos-refugio, en el norte de la loma de Tüse, cuya misión era probablemente defender la zona de Korba contra Tüse; estos dos castillos se hallan ocultos entre escarpadas rocas. Lo mismo habría ocurrido con las fortificaciones que protegen hacia el oeste y el norte el entorno inmediato de Kyaneai. Estas fortificaciones muestran, sin embargo, que en la época clásica (los siglos V y IV antes de Cristo) la zona montañosa de Yavu aún no se hallaba bajo el dominio de Kyaneai, sino que muy probablemente estaba repartida entre diversos dinastas, con sus castillos de muros ciclópeos, que se enfrentaban entre sí.

El afán de notoriedad de tales dinastas está documentado también por impresionantes supulcros —tanto *tumuli* como sepulturas apoyadas en columnas y los llamados "sepulcros de héroes"—, en los cuales se hacían enterrar los jefes de las fortificaciones y sus familiares. Relieves de gran calidad artística e inscripciones licias, que a veces llevan una versión griega paralela, dan testimonio de las ansias de fama de tales personajes. De semejantes relieves e inscripciones hacemos réplicas en silicona, para conservar al menos duplicados de esos monumentos que van deteriorándose poco a poco con el paso del tiempo.

También se debe a nuestra prospección intensiva el descubrimiento de que en la época helenística hubo en el territorio de Kyaneai una distribución sorprendentemente regular de villas rústicas con torre. Tales villas existían evidentemente desde los tiempos clásicos. La torre central, que es rectangular o cuadrada y tiene muros de más de un metro de ancho, no respondía sólo a una necesidad de seguridad, sino también a otra de ostentación. Esto se manifiesta de modo especialmente claro en la época helenística (siglos III a I antes de Cristo), cuando más difundida se hallaba esa clase de villa rural: en esa época las torres se construyeron con sillares cuidadosamente tallados, en los cuales, por razones decorativas, el borde está más trabajado que el centro; lo que se pretendía subrayar con ese artístico muro, sin duda costoso, era el poder y la riqueza de los propietarios.

5. PLANO DE SITUACION de Kyaneai, con el teatro y la basílica de la necrópolis.

El lugar de Kyaneai y su entorno inmediato

La distribución regular de las villas rurales helenísticas con torre indica que la zona estaba dominada por una aristocracia, sin duda influyente y orgullosa, pero que constituía una comunidad de iguales. En ese momento no existían ya las residencias de dinastas de la época clásica; Kyaneai había sometido a su control la zona montañosa de Yavu y la había transformado en el territorio de una polis. Aproximadamente en el tránsito del siglo IV al III antes de Cristo, el centro de los asentamientos experimentó una mutación radical.

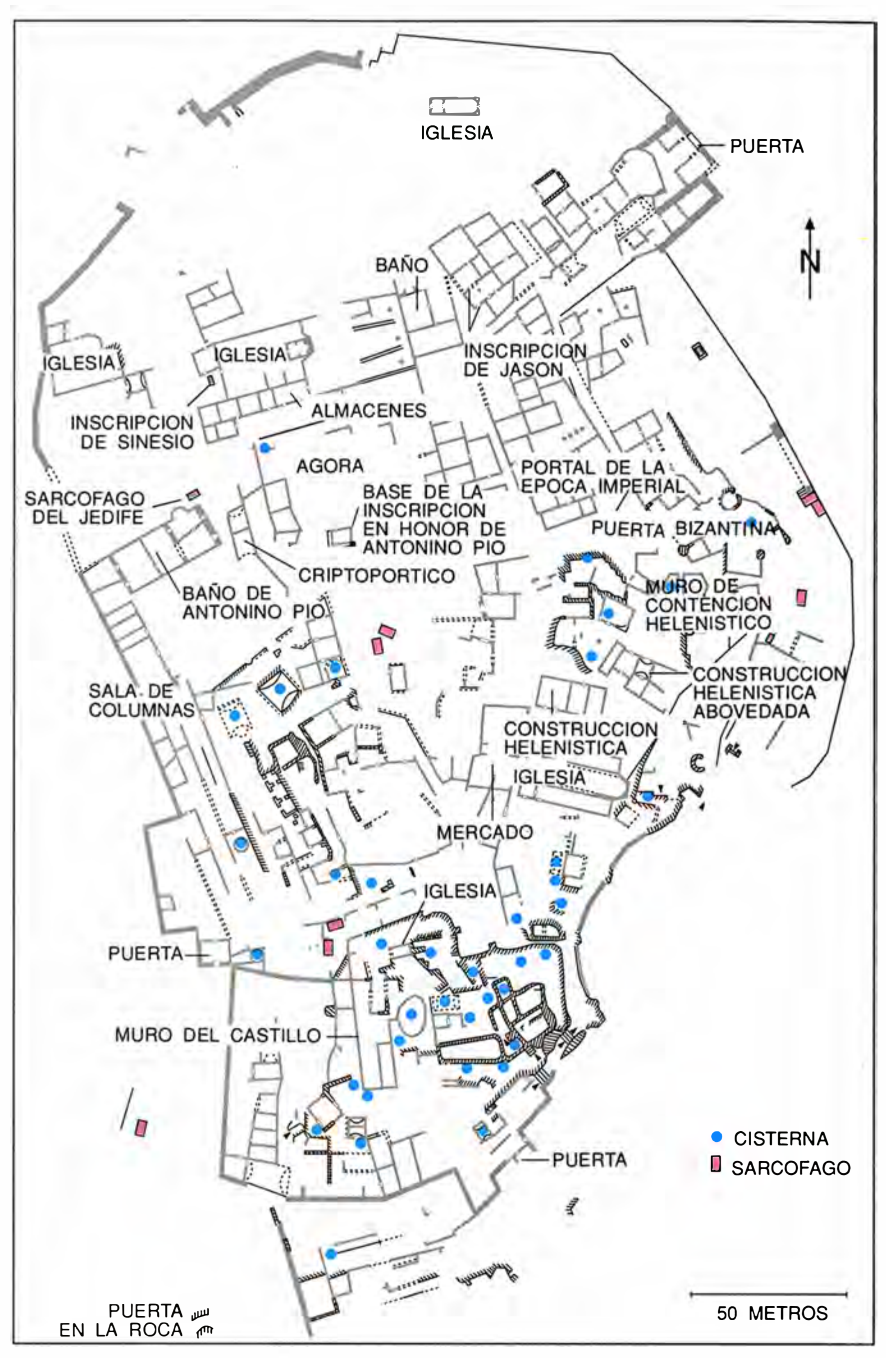
El castillo de los dinastas licios situado en la acrópolis fue derruido; del Kyaneai clásico han quedado, en lo esencial, sólo supulcros excavados en la roca y sarcófagos adornados con artísticos relieves. Lo que entonces surgió fue una ciudad según el patrón griego: una zona de 4,4 hectáreas, rodeada por una muralla y con el centro ocupado por una plaza abierta (ágora), que era su núcleo político y económico.

Las fases primitivas del desarrollo urbano de Kyaneai son difíciles de averiguar, pues los restos de edificaciones, a veces de varios metros de altura, pertenecen casi todos ellos a la época romana tardía o incluso a la bizantina. Helenísticos son en todo caso —además de ciertas partes de la muralla que circundaba la ciudad— una construcción con arcadas, que hoy se halla bajo tierra y que está situada al oeste del ágora, una sala con columnas que se extiende a lo largo del muro occidental, así como un suntuoso edificio, cuya función aún no está clara, en el sureste de la ciudad. También a su planificación originaria se debe la regularidad, conservada hasta la decadencia del asentamiento, que se observa en la distribución de los diferentes barrios, los cuales se orientan a menudo por el recorrido de la muralla.

Es en lo relativo a la historia primitiva de tales comunidades donde se muestran con toda claridad los límites de una investigación de campo restringida a la superficie del terreno, investigación que ha de preceder, desde luego, a toda excavación, pero que también necesita de ella en un determinado momento, para clarificar cuestiones históricas básicas. Sin embargo, por razones financieras y de organización no siempre son posibles las excavaciones, por lo que los *surveys* seguirán siendo decisivos durante mucho tiempo para reconstruir la historia de numerosos lugares antiguos.

Cuanto más tardía sea la época, tanto mejores serán los resultados que podrán ofrecer las investigaciones de superficie. En el caso de Kyaneai es posible obtener ya para la época imperial romana (siglos I al II) indicaciones mucho más detalladas que para la fase helenística.

Esa época constituyó el punto culminante de la historia de Kyaneai por lo que toca a su civilización. La mayoría de los sarcófagos de las necrópolis que se extienden alrededor de la ciudad —existen más sarcófagos aquí que en ninguna otra parte de Licia— son de la época imperial y permiten deducir la existencia de un gran número de familias pudientes. Las grandes edificaciones del período, visibles sobre el terreno y en parte muy bien conservadas todavía, comprenden un teatro, dos termas, un mercado al norte del ágora y otro al sureste de la ciudad, así como edificios públicos al nordeste del ágora, entre ellos tal vez la biblioteca, que está atestiguada por inscripciones, y con toda seguridad el consistorio. En la muralla nororiental es posible reconstruir, con los aproximadamente 150 fragmentos arquitectónicos que quedan, un arco triunfal de tres arcos y dos pisos. El templo de la diosa principal de Kyaneai, Eleuthera, fue completamente derruido a finales de la Antigüedad; presumiblemente se alzaba sobre un podio de piedra en el extremo oriental de la gran plaza descubierta que se extiende delante del teatro. Partes de ese templo, con la inscripción del edificio, las hemos descubierto empotradas en la cisterna de la basílica de la necrópolis.



6. PLANO DE LA CIUDAD de Kyaneai, al que se han incorporado los descubrimientos arqueológicos realizados hasta el momento. No se incluyen la mayor parte de las ruinas halladas fuera de la ciudad y algunas de las de dentro de ella, sobre todo en la parte norte. La disposición actual sigue mostrando la planta helenística.

También hay que mencionar un barrio residencial, de buena construcción, al este de la ciudad, en el que un portal decorado, de unos cinco metros de altura, formó la entrada al domicilio de un ciudadano especialmente distinguido. Es evidente que el mármol era más bien raro en Kyaneai; pero numerosas y muy artísticas partes arquitectónicas (los llamados "expolios"), de piedra caliza, empotradas en muros de época posterior, atestiguan que Kyaneai tuvo al menos el nivel corriente que poseyeron en la época imperial las pequeñas ciudades de provincia.



7. ESTA VILLA RUSTICA de la época imperial perteneció sucesivamente al menos a dos familias. Así lo atestiguan las inscripciones de los sarcófagos y de los monumentos honoríficos, documentados ya por expediciones anteriores, que no mencionaron, sin embargo, la granja. La abundante producción de la población campesina fue lo que posibilitó el bienestar de Kyaneai.

En la financiación de los edificios públicos intervinieron considerablemente los mecenas. El templo fue fundado por un tal Kallippos; la biblioteca, por Jasón, que en el siglo II después de Cristo era el vecino más rico e importante. En su honor fue erigido, a unos 500 metros al sureste de la ciudad, un gran monumento, con una inscripción grabada en la piedra. Dicha inscripción tiene una longitud de casi 15 metros y una altura de 1,50 metros.

Estos ciudadanos pudientes obtenían sus ingresos de sus quintas, como la que está situada como a un kilómetro en línea recta al suroeste de la ciudad y a la que hemos denominado la "granja de Alkimos", por el nombre de uno de sus propietarios. Quedan testimonios de que en la época imperial dos familias diferentes se sucedieron en la posesión de dicha quinta. Un impresionante conjunto de cuatro sarcófagos, dos de los cuales llevaron estatuas ecuestres de bronce, y varios monumentos honoríficos atestiguan la riqueza y el orgullo de los mencionados propietarios. Su procedencia de Arneai y de Aperlai, dos lugares de Licia central, indica que la elite invertía en bienes raíces más allá de las fronteras de las polis propias.

Documentación e interpretación

Una muestra del cambio habido en los planteamientos científicos es el hecho de que la ya mencionada expedición austriaca de hace más de cien años registrase las inscripciones de los sarcófagos de la "granja de Alkimos", pero las situase en diversos lugares de su colección y no mencionase en absoluto la granja. De igual manera, viajeros ingleses anotaron a mediados del siglo XIX la inscripción de un sarcófago de las cercanías de Tüse, pero no repararon en la granja, situada a pocos metros y cuyo propietario es mencionado en la inscripción.

Nosotros tomamos cuidadosas medidas de los restos de las villas rurales, como la de Alkimos, y también de las terrazas de cultivo próximas cuando se han conservado. Además de delinear la planta, en ciertos casos realizamos calcos y dibujos, para poder comparar la técnica de construcción con la de otras edificaciones que estén mejor datadas, aunque no todos los numerosos vestigios que hemos encontrado en el entorno inmediato de Kyaneai se documentan con el mismo detalle, pues son muy diversos su estado de conservación y su valor como expresión histórica. En los 42 kilómetros cuadrados que hasta ahora hemos explorado sistemáticamente hemos registrado unos 1200 restos de asentamientos, densidad nunca antes observada en ninguna otra región del mundo antiguo. Entre ellos se cuentan seis residencias de dinastas licios, cuatro fortalezas menores, 33 asentamientos grandes y pequeños, 136 que pueden calificarse de villas rústicas, otros 220 habitáculos, en su mayoría pequeños albergues de labradores o refugios de pastores, unas 90 sepulturas, 200 muros de terrazas, 50 molinos de aceite o de vino y 150 cisternas; estas últimas nos indican cuál fue el método preponderante de aprovisionamiento de agua en esta región, que ya en la Antigüedad era seca y pobre en fuentes. Seis canteras, así como seis pozos de cal y unos 33 hornos indican que, además de la producción agraria, hubo también otra industrial.

Todos los restos de edificaciones descubiertos son objeto de descripción, orientación con la brújula, medición y fotografía, siempre que no posean una significación especial. Las ruinas y sus inmediatas cercanías las exploramos en busca de cerámica y de otros restos pequeños. Por fin, los objetos y conjuntos importantes, como los asentamientos, las fortificaciones, las villas en buen estado de conservación, los santuarios y los monumentos funerarios los delimitamos con precisión y los medimos geodésicamente con los más modernos aparatos electrónicos, lo que permite trazar luego su plano en la mesa de dibujo. De esa manera podemos acabar de medir en el término de un día o dos, incluso grandes asentamientos rurales.

Según lo que hemos descubierto, esta región, que hoy es casi enteramente árida y cuyas pobres aldeas turcas son abandonadas cada vez más por los varones aptos para el trabajo, estuvo muy poblada en la Antigüedad y fue cultivada con intensidad, incluso en las faldas de las colinas, para producir cereales y con plantaciones de viña y olivo. Las costosas obras urbanas de Kyaneai en la época imperial exigirían el aprovechamiento de todos los recursos agrarios. Hoy esta región no podría financiar ni alimentar en modo alguno semejante centro urbano.

El punto culminante del poblamiento se dio en las épocas romana y bizantina (siglos I al XII). La técnica de los muros y los restos de cerámica permiten deducir que incluso villas rústicas de los siglos V y IV antes de Cristo continuaban siendo aprovechadas a finales de la Antigüedad e incluso bastante después. Por otro lado, no es raro que asentamientos cuyos muros de mortero, hechos de fragmentos pétreos, indican que son de época posterior, surgieran sobre sus predecesores, que se remontan a la época helenística.

Nuestras investigaciones contribuirán a aclarar en cierto modo algunas de las cuestiones aún no resueltas que mencionamos en la introducción de este artículo y que se refieren a

la estructura de los asentamientos en la Antigüedad. Así hemos comprobado que el cinturón de villas comenzaba ya a una distancia de 200 o 300 metros de la muralla de Kyaneai y que, por tanto, confinaba directamente con la zona suburbana. De ello es preciso concluir que tampoco la mayoría de la población campesina que cultivaba el entorno inmediato de Kyaneai residía en ella.

La población que vivía intramuros no pudo ser, de todos modos, muy numerosa, pues de las cuatro hectáreas y media que ocupaba el asentamiento los edificios públicos representan al menos la mitad. No muchas más de 1000 a 1500 personas podrían vivir en los bien construidos barrios al este del ágora, en los habitáculos pétreos situados al oeste y en el barrio del norte, claramente peor edificado y completamente destruido más tarde por los terremotos; algunos centenares más podrían hacerlo en las casas construidas fuera de los muros, un número relativamente pequeño de las cuales era de piedra y las demás, acaso, de material perecedero (madera o tabique de madera y barro).

Los habitantes de la ciudad serían, por un lado, ricos propietarios de terrenos; por otro, comerciantes que vendían sus productos en los mercados; y, por ultimo, personal al servicio de las termas, de la biblioteca y de otras instituciones. Los artesanos residirían en el cinturón suburbano, sobre todo en un sector de casas construidas parcialmente en piedra al oeste del teatro, donde un gran montón de escombros, así como canteras cercanas, atestiguan la actividad de picapedreros.

En consecuencia, apenas quedaba sitio en Kyaneai para los agricultores y campesinos. En los aspectos político, económico, social, religioso y cultural el lugar actuaba sobre todo como centro organizativo.

Una densa red de comunicaciones —hasta ahora hemos encontrado unos 200 caminos antiguos en el entorno inmediato— unía entre sí y con la ciudad los asentamientos rurales. A su vez la ciudad aseguraba el contacto con el mundo exterior, incluidos sus productos, por medio de una vía, en parte adoquinada y en parte tallada en la roca, que llevaba al puerto de Teimiussa; asas de ánforas que llevan un sello con el nombre del fabricante, que hemos hallado en asentamientos rurales, atestiguan contactos con la potencia marítima de Rodas, la cual estuvo siempre muy interesada en Licia y que controlaba, entre otras cosas, la isla de Megiste, cercana a la costa. A la citada vía se añadía un gran camino que atravesaba el país y que seguiría aproximadamente el mismo trazado que la principal carretera actual, que pasa bajo la acrópolis de Kyaneai. Conducía a los importantes centros portuarios de Antiphellos (el Kas actual) en el suroeste y de Myra en el este.

El espacio rural

Nuestro proyecto de investigación arroja también luz sobre las condiciones de los asentamientos rurales. Las quintas que en ellos había eran de muy diferente extensión; el número de habitaciones del piso bajo va de una o dos a doce. Esto permite inferir que existían diferencias económicas y sociales, así como relaciones de dependencia, cosas todas ellas que apenas podremos reconstruir con detalle basándonos en los meros restos arqueológicos.

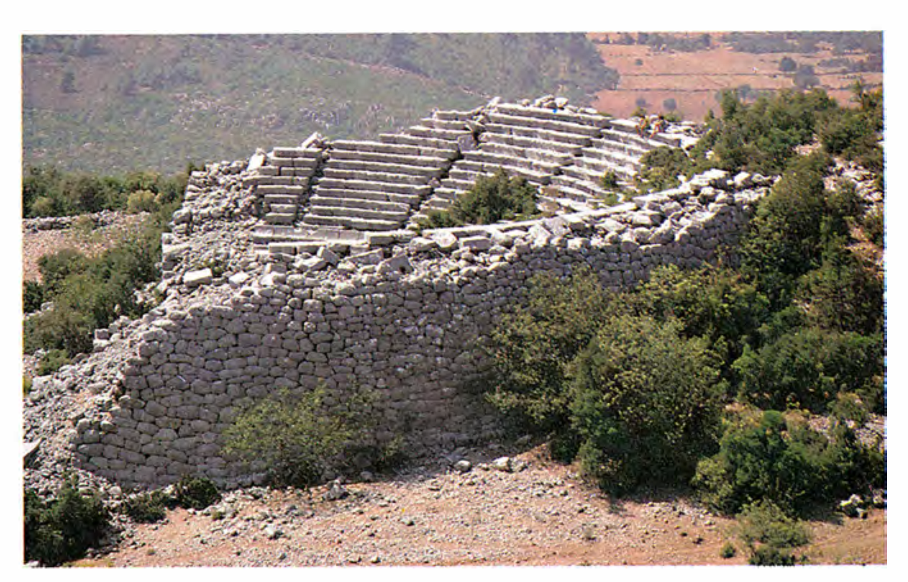
También es notable la coexistencia de villas rústicas aisladas con asentamientos agrarios más o menos grandes, a los que cabe calificar de aldeas. Esto diferencia a Licia de las provincias occidentales del Imperio Romano, en las cuales la villa era la unidad económica agraria fundamental; podía haber otros núcleos de tipo comercial, como los que se instalaban en los cruces de caminos, pero no eran aldeas de labradores.

Los asentamientos de la zona que estamos investigando constan hasta ahora de una villa rústica con unos pocos habitáculos incorporados a ella, donde residían los campesinos: cabe aplicar a estos sitios la calificación de *chorion*, empleada en las fuentes escritas antiguas, que designa un pequeño núcleo rural. En cambio los mayores han de ser *komai*, centros de una unidad administrativa agraria. Un lugar de reunión, excavado en la roca, en forma de teatro, que se encuentra en la actual aldea turca de Güneyyaka, podría ser uno de esos centros.

Estas comunidades tenían en su mayor parte una base vital agraria, como lo muestran los molinos de aceite. Pero en sus alrededores había también dolinas (ahondamientos en la roca), que permitían obtener cal; y muchos de los lugares tenían indudablemente un acentuado carácter industrial. Así, en un asentamiento de terraza situado al borde de la planicie de Yavu hemos descubierto hornos, escorias de hierro e instalaciones para fabricar cerámica. Los hornos de cerámica indican que había una producción propia de ánforas, en las que se recogían los productos de las cosechas de aceite y vino.

Esta vitalidad del espacio rural se mantuvo o incluso aumentó en la época romana tardía y en la época bizantina. Es algo que resulta sorprendente a la vista de la rápida disminución del número de inscripciones y de la decadencia política, económica y cultural postulada comúnmente para el final de la Antigüedad. Casi todos los asentamientos rurales descubiertos por nosotros muestran una gran actividad constructiva en esta fase; tal vez muchos de ellos surgieran precisamente entonces.

Restos de cerámica vidriada verde o amarilla indican una continuidad que



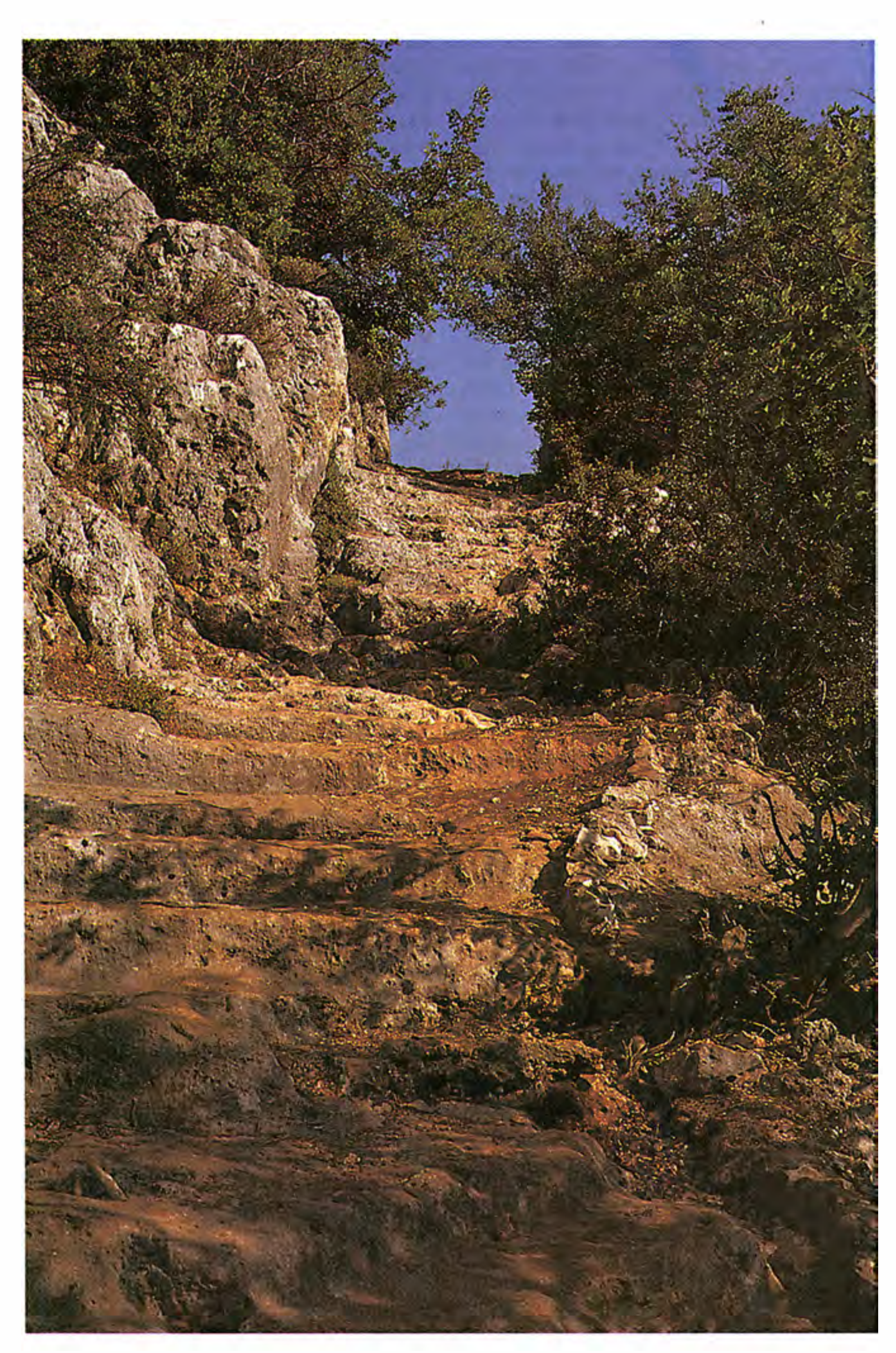
8. EL TEATRO DE KYANEAI estaba situado ante las puertas de la ciudad, en la parte suroeste. Esta y otras grandes construcciones de la época imperial indican que la pequeña ciudad provinciana alcanzó el punto culminante de su civilización en los primeros siglos cristianos.

llega hasta mediados de la época bizantina. Además hemos encontrado ruinas de pequeñas iglesias, 15 hasta el momento, en la zona que tenemos explorada. Se levantan casi siempre en un sitio marginal, como para proteger mágicamente los asentamientos. Por su tipo de construcción parecen ser lo más pronto del siglo VII al IX y constituyen un testimonio de la profunda cristianización del país.

Muchas tradiciones antiguas se conservaron, sin embargo, de manera oculta. Por ejemplo, un sarcófago situado aproximadamente a un kilómetro al sur de Kyaneai tiene una tapa de estilo licio antiguo, pero está adornado con símbolos cristianos y en él fue enterrado un hombre llamado Juan.

La situación y el desarrollo de los asentamientos de la región investigada por nosotros dependían claramente de las condiciones del marco político. Mientras que en la época clásica se erigieron fortificaciones en muchos lugares o se utilizaron al menos defensas naturales —por ejemplo, la cumbre de una colina rocosa—, en la época helenística se preferían las zonas bajas de las pendientes o las cumbres llanas de las colinas. La *pax romana*, sistema jurídico y de seguridad garantizado para todo el Imperio por los emperadores romanos, hizo superfluas las medidas defensivas. Esto se muestra, por ejemplo, en la "granja de Alkimos", que está situada en una hondonada y cuyos muros son de anchura normal, pero también en los numerosos asentamientos de la época imperial, que fueron construidos, sin fortificación alguna, en terrazas naturales, inmediatamente por encima de las planicies fértiles.

Tampoco en los asentamientos posteriores se encuentran instalaciones defensivas. Esto permite suponer que incluso a partir del siglo IV después de Cristo la necesidad de defensa de la población campesina no estaba especialmente desarrollada, aunque, según la tradición, las bandas de ladrones, las tensiones de la política interna y las incursiones de enemigos extranjeros —en especial los sasánidas persas, los germanos orientales y, finalmente, los árabes— llevaron la inquietud a muchas partes de Anatolia. Ni siquiera los desembarcos ocasionales de tropas árabes en la cercana costa parecen haber ocasionado grandes temores; quizá los campesinos era advertidos a tiempo y se retiraban a Kyaneai.



9. UNA DENSA RED de vías y caminos permitía un animado tráfico entre el centro y su periferia. Esta carretera excavada en la roca llevaba al puerto de Teimiussa, a través del cual mantenía Kyaneai relaciones con importantes potencias comerciales.

Florecimiento del cristianismo y decadencia

Kyaneai es una ciudad bizantina de las mejor conservadas, con restos de construcciones que muchas veces tienen más de cinco metros de altura. A finales de la Antigüedad, y de nuevo en la época bizantina, se renovó la muralla, se la adelantó hasta el borde del declive escarpado y se la reforzó, hay que suponer que tras derrumbes parciales acaecidos durante la *pax romana*. En la parte oriental, donde el declive es menor, se conservó también la línea de defensa helenística, que transcurre por encima de la nueva muralla, y se construyó una puerta.

Pero, en última instancia, estos esfuerzos fueron inútiles. Al noreste, la muralla está completamente destruida en el lugar donde se encontraba una puerta monumental. Un gran terraplén situado en el exterior fue posiblemente la colina de asedio desde la cual penetraron en la ciudad los conquistadores. No sabemos todavía si se trató de enemigos seléucidas u otomanos, o si es que Kyaneai fue víctima de las turbulencias de la política interna en la época bizantina.

En todo caso, nuestros descubrimientos indican que el lugar continuó siendo hasta ese momento un centro urbano lleno de vida. Es cierto que las instituciones políticas de la Antigüedad habían decaído y que sus edificios habían sido remodelados o dedicados a otros fines. La totalidad del material pétreo del templo de Eleuthera tuvo incluso que servir, hacia el año 500, para construir una basílica cristiana de tres naves en la necrópolis situada entre la muralla y el teatro; el consistorio y la biblioteca fueron al parecer transformados en viviendas; y las grandes termas de la zona oeste fueron utilizadas en la época bizantina, al menos parcialmente, como cisternas. Pero en conjunto se conservó el plano de la ciudad procedente de la época helenística y a él se acomodaron incluso las iglesias, que hubieron de renunciar así a una exacta orientación hacia el este.

En el siglo VI se construyeron dos grandes basílicas de tres naves, una al sur y otra al norte de la ciudad. Hemos hallado las huellas de la primera al detectar que una pequeña capilla de época posterior estaba empotrada en un ábside demasiado grande. A unos 25 metros al oeste de la capilla hemos encontrado, cubierto por una espesa vegetación, un gran dintel, ricamente adornado, con la inscripción fundacional de una iglesia dedicada a María. Por ello hemos medido con cuidado los restos de muro, completamente derruidos y casi irreconocibles, entre el ábside y el dintel, y así hemos podido reconstruir la basílica.

Según la inscripción fundacional, un obispo llamado Sinesio dedica esta iglesia a María, la Madre de Dios; la fórmula mariana empleada indica una fecha posterior al concilio de Efeso, celebrado en el año 439. Listas bizantinas de obispos señalan que Kyaneai fue, entre el 530 y el 869, un obispado sufragáneo de la diócesis de Myra (sufragáneo es el obispo de un lugar sujeto a un metropolitano). La ciudad de Kyaneai fue durante esta fase un centro cristiano importante, contando con tres basílicas simultáneamente.

En un momento que aún no es posible datar con exactitud, el control del Mediterráneo oriental por los árabes y el consiguiente cierre de las comunicaciones marítimas con los ricos países del Cercano Oriente (Siria, Palestina, Egipto) condujeron necesariamente a la decadencia de la ciudad. Faltaban medios y conocimientos arquitectónicos para mantener las basílicas, que fueron sustituidas por iglesias o capillas menores, de toscos muros; de ellas hemos descubierto seis.



10. ESTA INSCRIPCION conmemorativa de la construcción de una iglesia en honor de María es seguramente del siglo VI. Pero en los últimos tiempos de Kyaneai las basílicas dejaron paso a modestas iglesias.

Según esto, los distintos barrios de la ciudad continuaban habitados. La decadencia de la arquitectura no tiene que haber coincidido, por tanto, con una merma de la población. En contra de ello habla también el mantenimiento o la construcción de la red de cisternas en la época bizantina, red que minaba literalmente el suelo de Kyaneai y que, a falta de fuentes y de acueductos, era lo único que aseguraba el aprovisionamiento de agua.

La desertización de la ciudad y de sus alrededores se halla más bien relacionada, como antes se ha indicado, con la penetración de tribus nómadas a partir de los siglos XII o XIII. Las consecuencias económicas, sociales y ecológicas de esa penetración configuran hasta el día de hoy la imagen de la región y de sus asentamientos. Dado que en la actualidad la población rural apta para el trabajo emigra a Demre, que es un centro de invernaderos, o bien se pasa a oficios relacionados con la construcción de carreteras, quedarán cada vez más abandonadas incluso la mayoría de las aldeas que fueron creadas en el siglo XIX.

Sin embargo, la activa administración forestal de Kas ha repoblado de pinos grandes extensiones de terreno. Las máquinas excavadoras han destruido así los vestigios de varias villas rústicas de la Antigüedad; dentro de 30 años los bosques habrán cambiado completamente la fisonomía de esta región. Pero el humus que habrá vuelto a aparecer en las laderas puede de que la transforme a largo plazo en una fértil zona agraria, como lo fue en la Antigüedad. Nuestras investigaciones muestran con toda claridad que la región central de Licia posee ese potencial.

Esos cambios paisajísticos y económicos básicos son inevitables, y por ello resulta tanto más urgente realizar un registro de las ruinas antiguas. Pero unas excavaciones que satisfagan a las actuales demandas científicas llevan mucho tiempo, son costosas y han de limitarse a pequeñas superficies. Por ello, a la vista de la inmensa masa de monumentos que existe en la superficie del terreno y que aún no ha sido explorada en regiones como Anatolia, la prospección superficial sistemática se convertirá en los próximos decenios en el método histórico-arqueológico dominante, si es que se quiere salvar esos monumentos para la ciencia y también perpetuarlos, al menos en parte, para las generaciones venideras.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

VORBERICHT ÜBER FELDFORSCHUNG IM YAVU-BERGLAND BEI KAS. Frank Kolb y otros, en Istanbuler Mitteilungen. Dirigido por el Deutsches Archäologisches Institut de Estambul. Tomo 73. 1991.

LYKISCHE STUDIEN 1: DIE SIEDLUNGSKAMMERN VON KYANEAI IN LYKIEN. Dirigido por Frank Kolb, en Asia-Minor-Studien. Tomo 7. Serie dirigida por E. Schwertheim. Hobelt. Bonn, 1993.

LYKIEN. Frank Kolb y Barbara Kupke. Philipp von Zabern. Maguncia, 1992.

El cinetocoro

La distribución del material genético durante la división celular se realiza mediante la interacción entre los microtúbulos del huso mitótico y los cinetocoros de los cromosomas

Manuel Jesús Martínez Valdivia

Los biólogos confiesan su fascinación por los procesos que se desarrollan durante la división celular. En particular por uno de ellos: el movimiento de los cromosomas. Tiene éste por cometido distribuir el material genético durante la mitosis de las células eucariotas. Se asegura con ello que dicho material se mantenga constante para cada célula, generación tras generación.

Debido a ese mecanismo de control, el hombre posee 46 cromosomas en todas y cada una de sus células, el caballo 64, el maíz 20, el algodón 52 y la estrella de mar 36. Durante la meiosis, las células germinales reducen, en cambio, el número de sus cromosomas a la mitad, asegurando así que, tras la fecundación, el cigoto albergará el juego completo de cromosomas.

Tres son las estructuras fundamentales comprometidas en la mitosis o división celular: centrosoma, huso mitótico y cromosomas. De estos últimos y en especial de una formación clave de los mismos, involucrada en el proceso mitótico, vamos a ocuparnos aquí.

A partir de los años treinta, se han venido usando indistintamente los términos centrómero y cinetocoro para designar una misma región de los cromosomas. Pero conviene no confundirlos. Hemos de reservar el vocablo centrómero para aludir a la constricción primaria de los cromosomas, es decir, al lugar de intersección de las dos cromátidas (brazos del cromosoma); el cinetocoro designa el lugar de unión de los microtúbulos del huso mitótico a los cromosomas. El cinetocoro es, pues, la zona específica de la región centromérica donde se genera, a través de la interacción con las fibras del huso, la fuerza que permite el avance de las cromátidas de cada cromosoma hacia los polos. La región centromérica posibilita así, por un lado, la unión al huso a través del cinetocoro y, por otro, la unión de las dos cromátidas a través de la heterocromatina asociada al centrómero.

Aunque ambas regiones operan de manera conjunta y son necesarias para la segregación normal de los cromosomas durante la mitosis, cinetocoro y centrómero muestran diferencias morfológicas y bioquímicas. Ambas pueden estudiarse mediante la microscopía electrónica y la aplicación de los sistemas de vídeo a la biología celular junto con las técnicas de identificación y aislamiento de proteínas y clonación de ADN.

En la mayoría de los organismos estudiados, los cinetocoros se hallan circunscritos a un lugar, a la constricción primaria del cromosoma. El cinetocoro de los eucariotas superiores ofrece una estructura trilaminar localizada en la región centromérica. Observado al microscopio electrónico, distinguimos una zona densa u obscura (la más alejada del cromosoma), otra zona intermedia menos densa y, por último, una tercera densa u obscura, adyacente ésta a la cromatina centromérica. La capa externa posee de 40 a 60 nanómetros de espesor, la intermedia de 25 a 30 nm y la interna de 40 a 60 nm.

Aparecen fibras delgadas de cromatina que enlazan la lámina externa del cinetocoro con la interna centromérica. Esa lámina externa se une, durante la mitosis, a los microtúbulos del huso mitótico, unión que se produce a través de ciertas fibras de cromatina que constituyen la corona; se supone que en la corona acontece la unión específica de la tubulina (principal proteína de los microtúbulos).

Los microtúbulos desempeñan un papel principal en la función del cinetocoro. Se trata de estructuras dinámicas constituidas por 13 profilamentos cuyo proceso de formación y destrucción dentro de una célula eucariota se halla sometido a una regulación temporal. Entre las funciones que ejercen los microtúbulos durante las distintas fases del ciclo celular destaca la de facilitar el ensamblaje correcto del huso mitótico.

Los microtúbulos son estructuras polares compuestas, en buena parte, por dos proteínas emparentadas: alfa y beta tubulina, que forman el heterodímero de tubulina. Por su carácter polar, una punta del microtúbulo crece más deprisa (extremos positivo) que la otra (extremo negativo) mediante la adición de nuevos dímeros de tubulina. Durante el proceso de la división nuclear mitótica, los microtúbulos arrancan de los extremos negativos en los polos del huso, o centrosoma, y progresan hacia el citoplasma mediante la adición de subunidades de tubulina al extremo positivo. (Berl R. Oakley, de la Universidad de Ohio, acaba de describir una tercera tubulina, la gamma, que se aloja exclusivamente en los polos del uso y no en los microtúbulos; parece, pues, hallarse implicada en la capacidad de nucleación de los centrosomas y en el establecimiento de la polaridad de los microtúbulos.)

La estructura laminar del cinetocoro puede variar su posición en el interior del cromosoma; el centrómero, y el cinetocoro con él, puede quedar en el centro del cromosoma (cromosoma metacéntrico), más cerca

MANUEL JESUS MARTINEZ VALDIVIA se doctoró en ciencias químicas por la Universidad de Granada en 1979. Tras su paso por el Centro de Biología Molecular de la Universidad Autónoma de Madrid y posterior estancia de tres años en el departamento de biología celular de la Facultad Baylor de Medicina de Houston, lo contrató la Universidad de Alabama en Birmingham. Desde 1987 es profesor de bioquímica y biología molecular de la Universidad de Cádiz. Su investigación se centra en el estudio molecular de la región centromérica de los cromosomas y su función en la mitosis.

de un extremo (cromosoma acrocéntrico) o en un extremo del cromosoma (telocéntrico).

Organismos tan dispares como algas, peces, aves, plantas y mamíferos presentan la estructura laminar del cinetocoro descrita. Pero existen otros modelos de organización del cinetocoro. En levaduras, hongos y algunos insectos, son muy pocos los microtúbulos que se unen a cada cromosoma y no se observa región de unión, la típica estructura trilaminar. (En el caso de la levadura *Saccharomyces cerevisiae* sólo se da un microtúbulo por cinetocoro.)

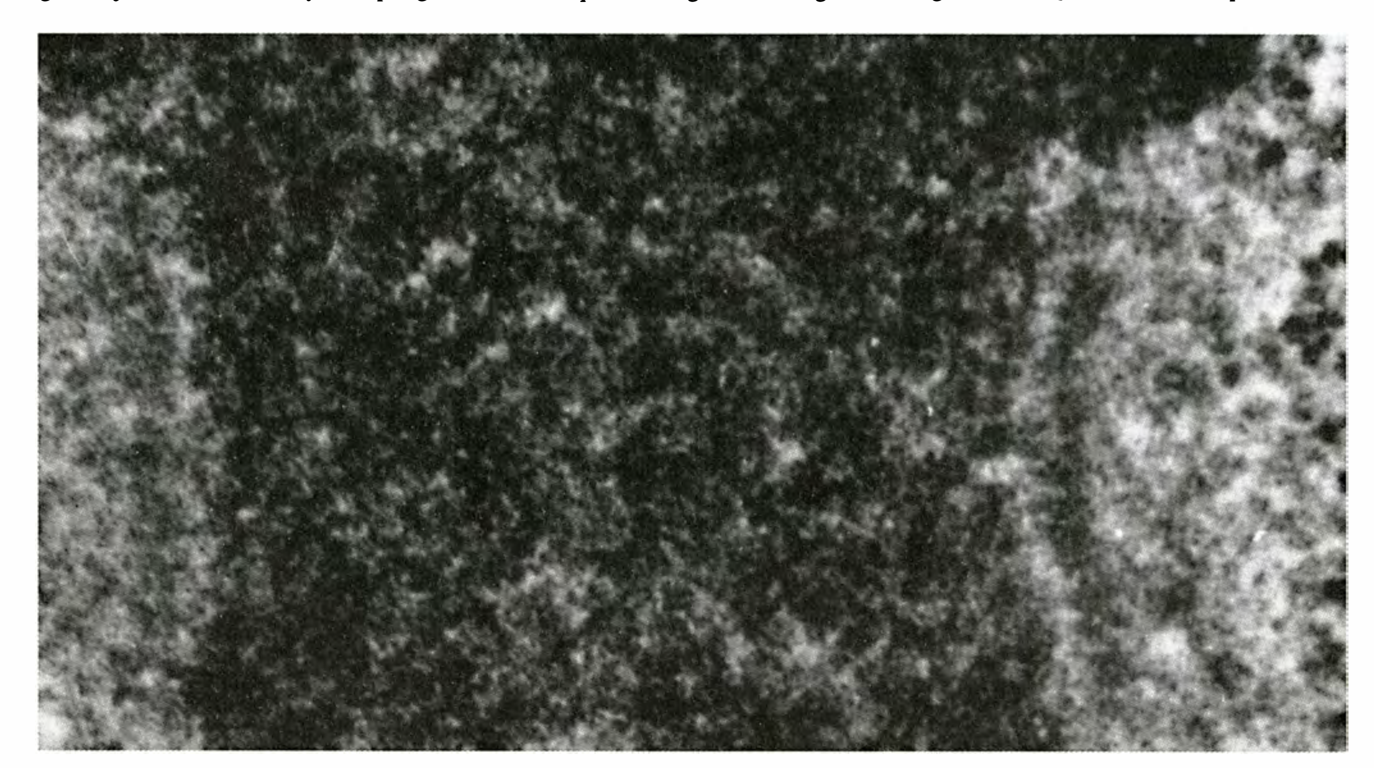
En determinadas plantas superiores y ciertos artrópodos, los microtúbulos no se unen a una constricción primaria, sino que lo hacen al cromosoma por entero. Se trata de los llamados cinetocoros difusos, no localizados. En los dinoflagelados, el cinetocoro se halla embebido en la propia envoltura del núcleo celular, con los microtúbulos que provienen del citoplasma unidos a la lámina externa y, unida a la capa interna, la cromatina nuclear.

¿De qué modo se relaciona la estructura trilaminar del cinetocoro con la organización del ADN de la región centromérica? De acuerdo con Jerome B. Rattner, de la Universidad de Calgary, las láminas están constituidas por fibras de cromatina que arrancan del centrómero, se prolongan lejos del mismo y se pliegan para volver hacia el centrómero de nuevo. El hacinamiento de las fibras de cromatina a cierta distancia del centrómero crearía la lámina externa del cinetocoro, y éste vendría a ser una continuación de la nucleoproteína centromérica con una organización especial que originaría la estructura trilaminar observada por microscopía electrónica.

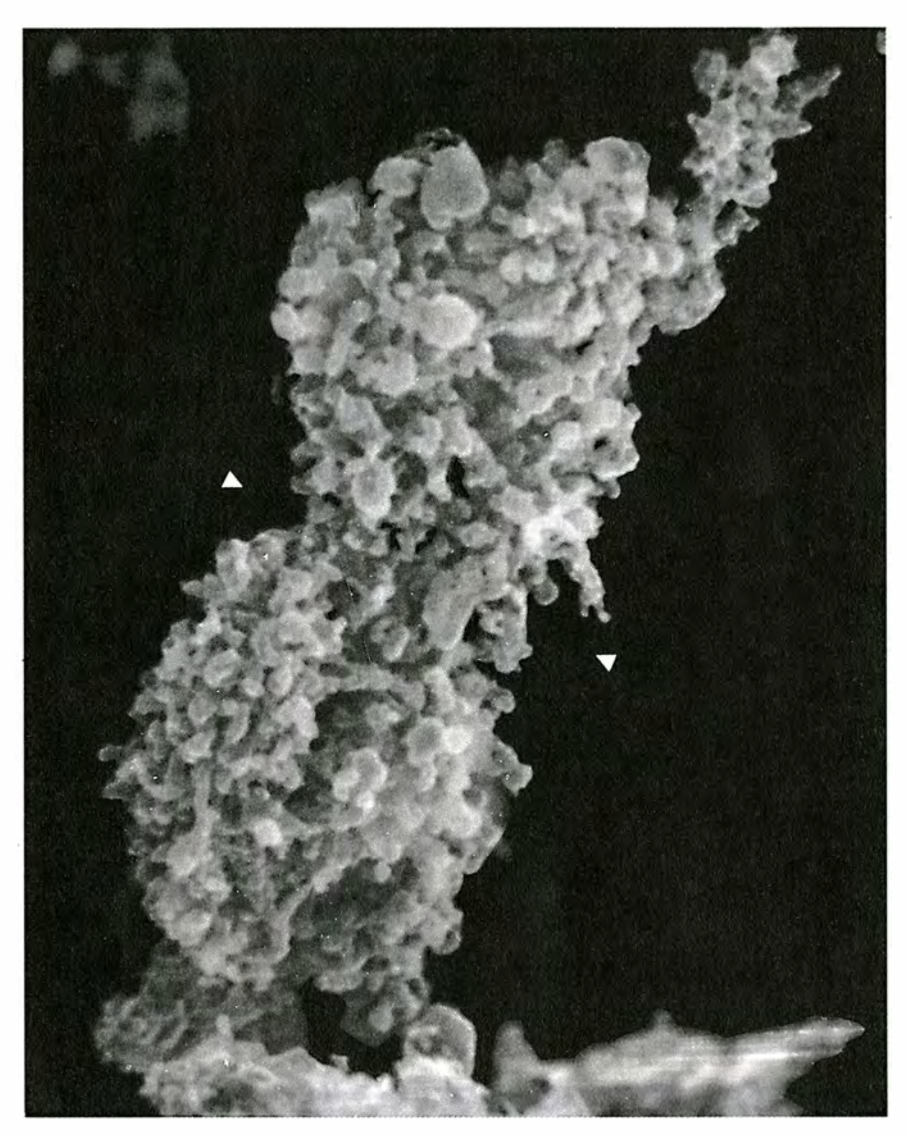
En los organismos inferiores que carecen de la estructura trilaminar, pensemos en *S. cerevisiae*, aparece difusa la distinción entre cinetocoro y centrómero. En esos casos, los microtúbulos se unen directamente a las fibras de cromatina centroméricas, aunque en el ejemplo particular de la levadura mencionada la cromatina se uniría a un solo microtúbulo.

La caracterización de los componentes moleculares de la región centromérica y su estudio en la escala filogenética nos ayudan a conocer la evolución del centrómero indiviso primitivo (levadura) hacia la estructura trilaminar (mamíferos). En los organismos superiores, sabemos que cada cromosoma se une, durante el proceso de mitosis, a varios microtúbulos; la estructura molecular y la organización del cinetocoro ayudan a explicar ese fenómeno. El cinetocoro de las células de mamífero consta de múltiples unidades de cromatina que se organizan originando la estructura trilaminar mencionada. Las unidades de cromatina son, a su vez, complejos de ácido nucleico y proteína, cada uno dotado de capacidad de unión a los microtúbulos del huso mitótico. El número de microtúbulos que se anclan en el cinetocoro depende, en cada especie, del número de complejos de ácido nucleico y proteína que posea.

Durante la división celular, el cinetocoro, como parte que es del cromosoma, ha de duplicarse y separarse con las cromátidas. Para estudiar ese proceso de replicación se ha recurrido a técnicas de inmunofluorescencia indirecta, mediante el empleo de anticuerpos encontrados en el suero de pacientes con ciertas enfermedades autoinmunes de tipo reumatoide, fundamentalmente el sindrome de CREST. A comienzo de los años ochenta, en el laboratorio de Eng Tan en la Jolla, California, se descubrió que esos sueros humanos teñían, en cultivos celulares, determinada parte del cromosoma asociada a la región centromérica. Se trataba del cinetocoro. Vióse, además, que éste se hallaba asociado a cada cromátida en la fasa G1 del ciclo celular, antes de la duplicación del ADN. En el laboratorio de Bill Brinkley, en Houston, se demostró que, tras la replicación del ADN en la fase G2 del ciclo celular, cada cromosoma presentaba dos cinetocoros asociados al material genético. Quedaba claro que el nú-



1. CROMOSOMA DE MAMIFERO en metafase. El cinetocoro se distingue en la región centromérica, siendo ésta la zona de constricción primaria del cromosoma condensado donde se sitúa el centrómero. Puede apreciarse la interacción de los microtúbulos provenientes de la región del centriolo con la lámina externa del cinetocoro, durante la mitosis.



2. CROMOSOMA HUMANO observado al microscopio electrónico de barrido. En la constricción indicada por la flecha se halla la región centromérica, donde se encuentra, a su vez, el cinetocoro. La estructura trilaminar del cinetocoro no se aprecia en la fotografía por tratarse de una continuación de la cromatina del centrómero. Es necesario un corte transversal del cromosoma para poder observar la organización estructural en láminas de distinta densidad electrónica del cinetocoro.

mero de cinetocoros correspondía al número diploide de cromosomas y que la replicación se producía en la fase final de la interfase del ciclo celular. El empleo de este tipo de anticuerpos ha resultado muy provechoso para estudiar el movimiento de los cromosomas durante la mitosis y conocer el papel que el cinetocoro desempeña en ese proceso.

La investigación realizada en cultivos celulares pone de manifiesto que, durante la mitosis, resulta decisiva la unión de los microtúbulos al cinetocoro para el alineamiento de los cromosomas en la metafase y para su desplazamiento durante la anafase. El cinetocoro se convierte de ese modo en un elemento más de los que componen el aparato mitótico.

A mediados de la década de los setenta surgió la hipótesis, apoyada en estudios *in vitro*, según la cual los cinetocoros aportarían la tubulina necesaria para formar los microtúbulos; es decir, los cinetocoros "nuclearían" o cebarían la constitución de los microtúbulos. Diez años después, se propuso otra hipótesis alternativa: los cinetocoros capturarían los microtúbulos ya formados en el centrosoma (presumiblemente en el material pericentriolar que rodea a los centriolos), interaccionando con los extremos libres de los mismos. De acuerdo con esta opinión, los microtúbulos recibirían los microtúbulos ya formados en los polos del huso.

Aunque los trabajos más recientes atribuyen a los cinetocoros la doble capacidad, *in vitro* al menos, de capturar microtúbulos constituidos y de nuclear la formación de los mismos, resulta difícil de aceptar lo segundo porque demanda una concentración altísima de tubulina *in vitro*, y sería derrochador para la célula *in vivo*.

La unión de microtúbulos al cinetocoro comienza al final de la profase celular, etapa de gran agitación de los cromosomas, así como de crecimiento y dinámica del huso mitótico. Ese proceso de unión se desarrolla en varios pasos. Después de la rotura de la membrana nuclear, los cromosomas se encuentran lejos de los polos del huso; de éstos comienzan a surgir microtúbulos que crecen en todas las direcciones. Tras un breve período de tiempo en el que unos microtúbulos crecen desde los polos y otros se acortan en dirección a los mismos, se produce la interacción de algún microtúbulo con el cinetocoro y, a raíz de ello, inicia el cromosoma su movimiento hacia el polo.

Conly Rieder, de la Universidad de Nueva York en Albany, ha estudiado en cultivos celulares la unión inicial de los microtúbulos a los cinetocoros durante la mitosis. Los microtúbulos aislados que emanan de los polos, cuando se aproximan a unos pocos micrometros del cinetocoro interaccionan con él. La microscopía electrónica nos revela, acerca de dicha interacción, que los microtúbulos establecen contacto sólo con la corona de la lámina externa del cinetocoro.

En ocasiones, los cromosomas se orientan hacia un polo del huso durante ciertos intervalos temporales. Esos cromosomas muestran movimientos oscilatorios hacia ese polo adoptando una forma típica en V. Tal orientación sugiere la presencia de una fuerza que actúa sobre los brazos de los cromosomas y es responsable de los movimientos de los cromosomas en prometafase.

Operada esa orientación inicial del cromosoma hacia un polo de la célula, entra en interacción el otro cinetocoro del mismo cromosoma con otros microtúbulos del polo opuesto del huso y, así, se establecerá un mecanismo de equilibrio de fuerzas en la transición prometafase-metafase entre las dos mitades del huso mitótico. De ese modo, y debido a los movimientos de aproximación y alejamiento hacia los polos, los cromosomas se van concentrando en el plano ecuatorial de la célula.

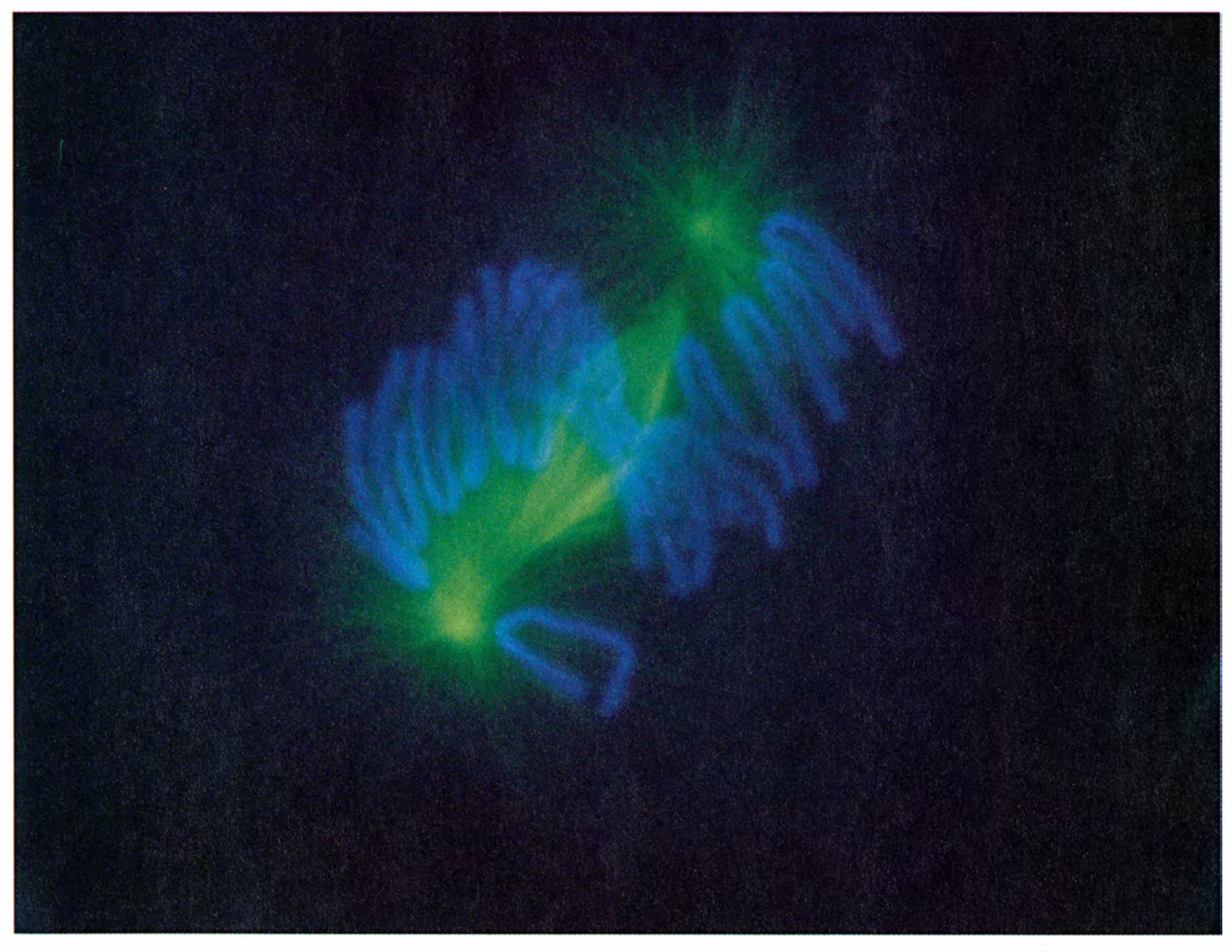
Tim Mitchinson, de la Universidad de California en San Francisco, propone la existencia de dos fuerzas motoras para explicar la orientación

definitiva de los cromosomas en el plano ecuatorial metafásico de la célula, y su posterior movimiento de separación durante la anafase. La primera fuerza, o motor, actuaría en el cinetocoro para tirar de los cromosomas hacia el plano metafásico y la segunda actuaría en los microtúbulos acortándolos para facilitar el acercamiento de los cromosomas a los polos durante la anafase. En relación con este movimiento anafásico, Rieder demostró que, si se seccionan los cromosomas en trozos, sólo se moverán hacia los polos los que contengan cinetocoros. Los brazos de los cromosomas carentes de cinetocoros se desorientan lejos de los polos del huso. De ahí la importancia de los cinetocoros en su interacción con los microtúbulos para la correcta orientación y separación de los cromosomas durante la mitosis.

El estudio de la mitosis en general y del cinetocoro en particular se ha visto favorecido por el empleo de ciertos compuestos que ejercen un efecto directo sobre la división celular. La colchicina, un alcaloide que se extrae de la planta *Colchicum autumnale*, impide la formación de microtúbulos al unirse a la molécula de tubulina, si bien se desconoce su mecanismo de acción. Cuando se agrega colchicina a las células en cultivo, la mitosis se estanca en la prometafase, no se ensamblan los microtúbulos, ni pueden separarse los cromosomas.

Por lo que al cinetocoro se refiere, el tratamiento con colchicina elimina la lámina externa, lo que respalda la idea según la cual los microtúbulos intervendrían en la propia estructura del cinetocoro (la fuerza motora ejercida por los microtúbulos del huso al unirse al centrómero provocaría la aparición de la lámina externa). Un efecto parecido ejerce el dietilestibestrol (DES), que degrada la estructura trilaminar del cinetocoro y la transforma en unilaminar. La mitomicina C, en razón de su afinidad por la cromatina centromérica, afecta también al cinetocoro; en cultivos celulares, esta droga empleada como agente antitumoral afecta a la replicación del ADN centromérico y produce la separación del cinetocoro del resto del cromosoma durante la mitosis. Todos esos ejemplos vienen a decirnos que muchas sustancias que impiden la división celular inciden en la propia función del cinetocoro.

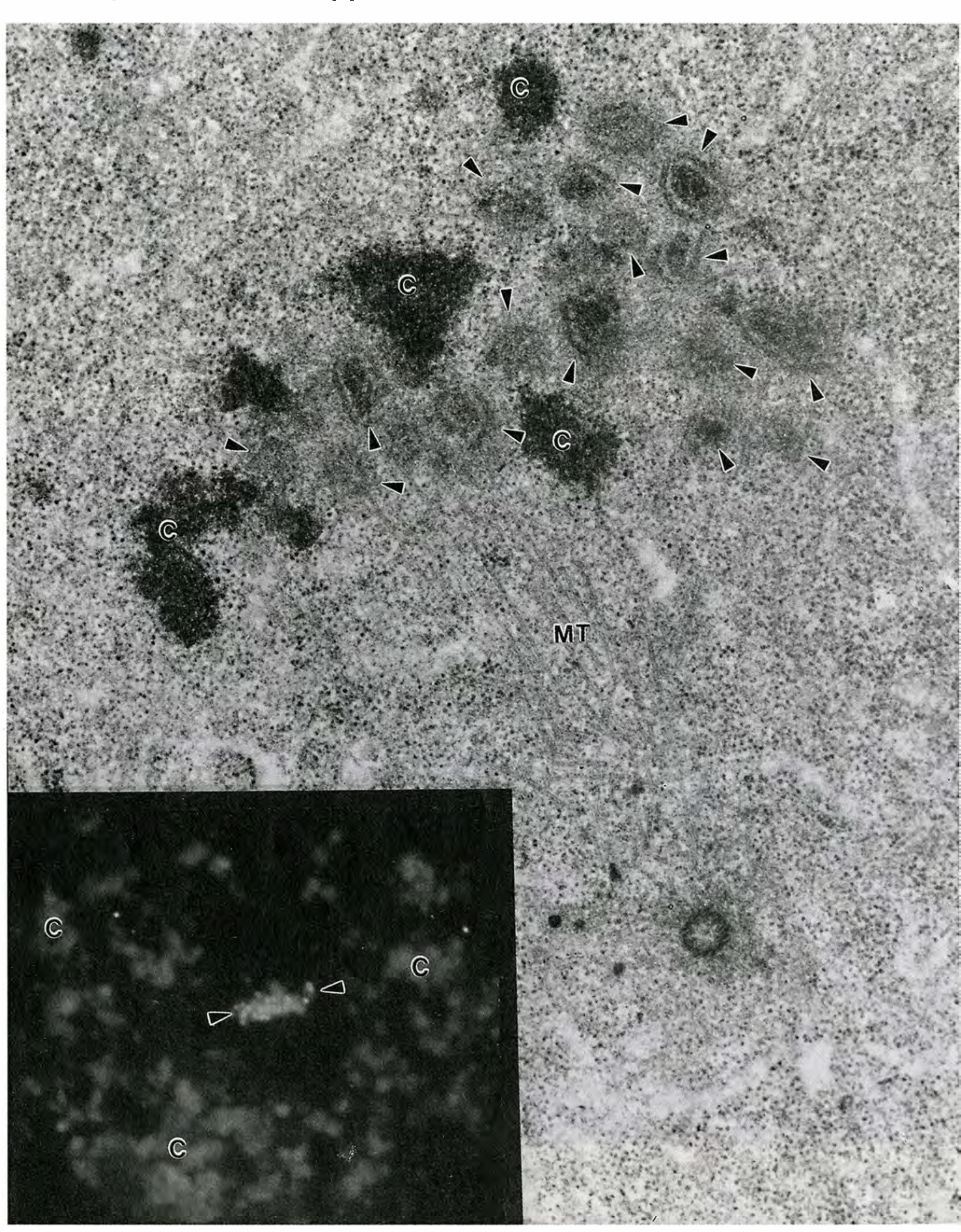
Hasta el momento, todos los intentos de aislamiento del cinetocoro para investigar su naturaleza han avanzado poco, por la razón principal de que no existe tratamiento que nos permita discriminar entre la cromatina centromérica y el resto del cromosoma. A pesar de lo cual, ciertas nucleasas, enzimas que degradan los ácidos nucleicos, permiten el enriquecimiento en cromatina centromérica debido a la mayor resistencia de ésta a la acción enzimática.



3. HUSO MITOTICO. Durante la mitosis, los cromosomas interaccionan con los microtúbulos del huso a través de los cinetocoros. En la fotografía, el ADN de los cromosomas está teñido de color azul debido al reactivo empleado. El color verde-amarillo de los microtúbulos se explica por la reacción con un anticuerpo antitubulina y fluoresceína. (Fotografía cedida por Conly Rieder, del Centro Wadsworth en Albany, Nueva York.)

En ese afán por lograr la purificación del cinetocoro, el grupo de Bill Brinkley, de la Universidad de Alabama en Birmingham, descubrió que la cafeína, en determinadas condiciones experimentales, induce la separación de la región centromérica de los cromosomas bloqueando la replicación del ADN centromérico; tras el tratamiento con cafeína, los cinetocoros liberados capturan microtúbulos y prosiguen el ciclo celular interrumpido. Se trata de una prueba más del papel activo del cinetocoro durante el movimiento de los cromosomas en la mitosis. Pero no disponemos aún de un método válido para purificar esa estructura en los organismos superiores.

¿Qué sabemos de la estructura molecular del cinetocoro? Creíase en la



década de los setenta que el cinetocoro constaba de ADN, ARN y proteína. La presencia de ARN la defendieron varios autores tras aplicar técnicas de tinción con agentes específicos de ARN o experimentar con enzimas degradantes de ese ácido nucleico (ARNasas). Pero la investigación posterior no pudo corroborarla. Hubo que esperar a los años ochenta para moverse con cierta seguridad en el conocimiento de la composición molecular y organización del cinetocoro. Obedeció ese impulso a dos avances técnicos: por un lado, el aislamiento del ADN centromérico de los cromosomas de *S. cerevisiae*, logrado en el laboratorio de John Carbon, de la Universidad de California en Santa Barbara, y, por otro, al descubrimiento ya mencionado de autoanticuerpos humanos específicos contra la región del cinetocoro en el laboratorio de Eng Tan.

Conviene que, al hablar de la estructura molecular del cinetocoro, incluyamos el centrómero, dada la íntima conexión entre uno y otro. La relación del ADN centromérico con la función del cinetocoro se puso de manifiesto a raíz de los trabajos pioneros de Carbon en 1980, cuando demostró que un fragmento específico del ADN centromérico de *S. cerevisiae* era imprescindible para la correcta segregación de los cromosomas. Ese segmento de ADN, constituido por 250 bases, se organiza en trozos cortos de secuencia homóloga, los llamados elementos I, II y III, que constan, respectivamente de 8, 78-86 y 25 nucleótidos. La cromatina centromérica está formada por unos 220 a 250 pares de bases.

La región centromérica presenta una estructura distinta de la del resto de la cromatina debido a la forma peculiar de engranaje de las secuencias de ADN y de las proteínas que integran dicha región del cromosoma. Cuando se modifica, por métodos artificiales, la estructura nucleotídica de alguno de los elementos componentes del ADN centromérico, en particular del III, se altera de tal suerte la función centromérica que puede llegar a impedirse la separación de los cromosomas. Además, estas secuencias de ADN centromérico han servido para la fabricación de cromosomas artificiales en el laboratorio, que actúan con la misma fiabilidad que los naturales en la célula. Todo lo cual no hace sino corroborar el papel imprescindible del ADN centromérico en el funcionamiento del cinetocoro de levaduras.

4. SEPARACION DEL CENTROMERO mediante tratamiento con cafeína. La técnica inhibe la replicación del ADN en cultivos celulares. Ello no obstante, los cinetocoros interaccionan con los microtúbulos del huso y la mitosis puede proseguir algún paso más, lo que demuestra que la región centromérica posee cierta autonomía funcional. Las flechas señalan los cinetocoros separados del resto de los cromosomas y teñidos por fluorescencia con anticuerpos anticentrómero. (Foto cedida por Bill Brinkley, del colegio Médico Baylor de Houston.)

Mucho peor se conoce la relación del ADN con el cinetocoro de plantas y animales. La región centromérica de diversos cromosomas eucariotas contienen secuencias repetidas de ADN, lo que se denomina ADN satélite. En 1970 se estableció, merced al trabajo pionero de Mary Lou Pardue y Joseph Gall, que este tipo de ADN forma parte de la heterocromatina centromérica de los cromosomas del ratón; de entonces acá se le ha encontrado en numerosos tipos celulares, hombre incluido. Si bien hemos de advertir que este ADN sólo es parte del centrómero, pero no de la estructura trilaminar del cinetocoro propiamente dicho.

En la región centromérica de los cromosomas humanos se acaba de descubrir una secuencia repetida conocida como ADN alfoide. Esta estructura se basa en la repetición de un monómero de 171 pares de bases que origina secuencias de miles de éstas, presentes en todos los cromosomas humanos. Téngase, no obstante, en cuenta que existe cierta variabilidad, en la secuencia del monómero, de un cromosoma a otro.

Aunque está por demostrarse la presencia de este tipo de ADN en otras especies eucariotas, Robert K. Moyzis, del Laboratorio Nacional de Los Alamos, describió en 1992 la existencia de un ADN con una secuencia muy repetida, (GGAAT)n, que tiene similitud con el elemento III del ADN centromérico de *Saccharomyces cerevisiae*. Técnicas de microscopía y tinción han permitido observar la presencia de esos segmentos repetidos en las regiones centroméricas de los cromosomas humanos y de otras 16 especies estudiadas, incluida la mosca del vinagre *Drosophila*.

Esa secuencia de ADN, conservada en el genoma de distintas especies en el curso de la evolución, podría constituir, quizás, un componente esencial del cinetocoro funcional de organismos eucariotas. Pero, a diferencia de lo acontecido con levaduras, seguimos sin conocer el ADN que forma el cinetocoro de organismos superiores y que es esencial para la función del mismo durante la segregación de los cromosomas.

Muy escasa es también la información que poseemos sobre las proteínas del cinetocoro en levaduras. Richard E. Baker y Daniel C. Madison, de la Universidad de Massachusetts en Worcester, acaban de identificar la CP1, proteína dotada de capacidad de unión con el elemento I del ADN centromérico de *S. cerevisiae*. El gen, clonado ya, determina una proteína de 39.000 daltons. El recurso a mutaciones inducidas permitirá dilucidar la localización exacta y la función de dicha proteína en el comportamiento del cinetocoro de levaduras.

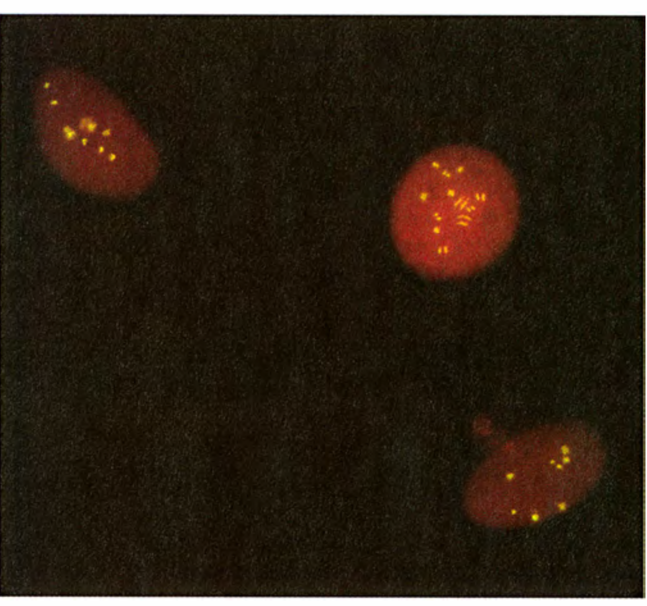
Otra proteína, la CBP1, identificada por Ronald W. Davis en Stanford en 1990, podría representar un papel estabilizador de la región centromérica en las levaduras. Pero la información más prometedora sobre proteínas del cinetocoro primitivo proviene del trabajo realizado en 1991 en la laboratorio californiano de John Carbon. Este grupo identificó un complejo proteico de 240 kilodaltons que tiene afinidad por el elemento III del ADN y consta de tres proteínas de 110, 64 y 58 kilodaltons respectivamente. Su actividad de unión al ADN depende de la fosforilación de alguno de sus componentes.

Cuanto sabemos sobre proteínas del cinetocoro en organismos superiores se ha obtenido, en buena parte, del trabajo con células de mamífero. Los trabajos que nosotros realizamos en Baylor con sueros humanos autoinmunes nos permitieron descubrir, en los años ochenta, que éstos contenían inmunoglobulinas contra proteínas; se trataba de las hoy conocidas por CENP-A, de 18 kilodaltons, y CENP-B, de 80 kilodaltons. Más tarde se identificaron, también por métodos inmunológicos, las proteínas CENP-C, de 140 kilodaltons, la CENP-D de 50 kilodaltons y más recientemente en 1992 la CENP-E de 312 kilodaltons.

De todas esas proteínas centroméricas humanas, la mejor caracterizada es el polipéptido de 80 kilodaltons. En 1987, el grupo de William C. Earnshaw, de la Universidad Johns Hopkins, aisló y secuenció el ADN que determinaba esa proteína. Mediante la producción de anticuerpos contra la proteína CENP-B expresada en la bacteria *Escherichia*

coli, se demostró la localización centromérica de este antígeno, aunque parece ser que la proteína se halla en el centrómero, no propiamente en el cinetocoro. Nuestro grupo de la Universidad de Cádiz, empleando péptidos sintéticos que contienen la secuencia de aminoácidos de la proteína CENP-B, ha obtenido anticuerpos que ponen de manifiesto la presencia de esta proteína en los centrómeros de distintas líneas celulares.

Aunque no está totalmente definida la ubicación del antígeno CENP-B en la región centromérica, algo ha avanzado el grupo de Hirosi Masumoto, de la Universidad de Nagoya. Han descubierto que el antígeno CENP-B se une a secuencias del ADN alfoide humano. Un fragmento de 17 pares de bases, la denominada caja CENP-B, que tiene la secuencia de 5′CTTCG....3′ y forma parte de la secuencia repetida de 171 pares de bases del ADN alfoide, es el lugar de unión de la proteína CENP-B.



5. CULTIVO DE CELULAS empleado para la técnica de inmunofluorescencia indirecta. Las células se tiñeron con un anticuerpo obtenido del suero de un paciente con síndrome de Crest (enfermedad de tipo reumatoide). Los cinetocoros de los cromosomas se tiñen de color amarillo por haberse usado un anticuerpo anti-inmunoglobulina humana marcado con fluoresceína. Los núcleos se tiñen de color rojo mediante ioduro de propidio, que reconoce el ADN. Como puede apreciarse, en la célula que no ha replicado su ADN (fase G1 del ciclo celular) los cinetocoros se manifiestan uno a uno; por contra, en la célula que ha duplicado el ADN (fase G2 del ciclo) los cinetocoros aparecen agrupados en pares de puntos fluorescentes, que indican su presencia en las dos cromátidas de los cromosomas.

Tomando todos esos datos en consideración, podemos decir que, si el ADN alfoide pertenece al centrómero pero no al cinetocoro, entonces la proteína CENP-B se hallará asociada sólo a la heterocromatina centromérica. En cambio, si el ADN alfoide es parte de la cromatina del cinetocoro, el antígeno CENP-B se asociaría a alguna de las láminas que constituyen la estructura del propio cinetocoro.

El análisis de la estructura molecular del antígeno CENP-B indica que uno de los extremos de la molécula, la parte del carboxilo terminal, contiene una cifra abundante de aminoácidos aspártico y glutámico. En razón de su carga neta negativa, estos aminoácidos posibilitan que la proteína CENP-B interaccione con otras proteínas dotadas de carga positiva, así las histonas o el propio autoantígeno centromérico humano CENP-A. Este antígeno de 18 kilodaltons, estudiado por K. Palmer y R. Margolis, del Centro Fred Hutchinson de Investigaciones Oncológicas en Seattle, constituye una proteína cuyas características bioquímicas recuerdan las de las histonas; a semejanza de éstas, CENP-A interviene en la organización de la cromatina del cinetocoro. Más recientemente el grupo de W. Earnshaw ha aislado y secuenciado el ADN humano que determina la proteína CENP-C, si bien no se conoce si esta proteína forma parte también del cinetocoro de células de origen no humano.

Para comprender qué misión cumplen los autoantígenos centroméricos durante la mitosis, se inyectaron en cultivos celulares anticuerpos de pacientes con el síndrome de Crest. Esos sueros impiden la formación correcta de los cinetocoros, dando lugar a una estructura anormal y a la inhibición del movimiento de los cromosomas en prometafase, aunque sin impedir la unión de microtúbulos al cinetocoro.

Además de los autoantígenos descritos se han identificado otras proteínas que, durante alguna fase del ciclo celular, se hallan asociadas a la región centromérica. En este sentido, las proteínas INCENP participan en el proceso de unión y separación de las cromátidas a través de su localización en el centrómero, pero no parecen que intervengan directamente en la función del cinetocoro. Proteínas relacionadas con los microtúbulos —dineínas, quinesina, S5-39, CENP-E y centrofilina— se asocian con el cinetocoro en alguna fase del ciclo celular. Asimismo, ciertas fosfoproteínas y la p34, una proteína clave para la regulación de la mitosis, se ha sugerido que están asociadas al cinetocoro.

Por último, entre los productos de numerosos genes, identificados en diversos organismos e involucrados en alguna etapa de la mitosis o la meiosis, podría hallarse la proteína motora que es responsable del movimiento de los cromosomas y cuya localización parece probable en el cinetocoro; la sospecha se basa en la capacidad que tienen tales proteínas para unirse al ATP.

Quedan muchas incógnitas por despejar dentro de la estructura y función del cinetocoro. Sabemos ya de su papel decisivo en la correcta separación de los cromosomas a través de la interacción con los microtúbulos. Parece razonable esperar próximos avances en las áreas siguientes: funciones de los antígenos CENP-A, CENP-B y CENP-C, composición del ADN imprescindible para la segregación cromosómica, interacción molecular del cinetocoro con los microtúbulos, identificación de las proteínas motoras de la mitosis y mecanismos de replicación del propio cinetocoro en relación con el ADN satélite centromérico. Todos esos son aspectos de la maravillosa maquinaria que porta la célula fecundada al estadio de organismo adulto.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE KINETOCHORE. M. B. E. Godward. *International Review of Cytology*, vol. 94, págs. 77-105, 1985.

MICROTUBULE DYNAMICS AND KINETOCHORE FUNCTION IN MITOSIS. T. J. Mitchinson. *Annual Review of Cell Biology*, vol. 4, págs. 527-549, 1988.

MITOSIS. MOLECULES AND MECHANISMS. Dirigido por J. S. Hyams y B. R. Brinkley. Academic Press, 1989.

EL HUSO MITOTICO. J. Richard McIntosh y K. L. McDonald. *Investigación y Ciencia*, Diciembre de 1989.

Ciencia y empresa

El lenguaje del cuerpo

Expresión corporal y ordenadores

¿Quién no se despereza, bosteza, sueña o dormita ante la pantalla del ordenador? Pero éste nada responde a nuestras muecas, o, al menos, así venía siendo: ahora, un neurólogo convertido en empresario está construyendo unos dispositivos gracias a los cuales se puede hacer música a partir de la acción de los músculos, desplazar un cursor con la mirada o lanzar en un videojuego una nave al hiperespacio con un simple acto de la mente.

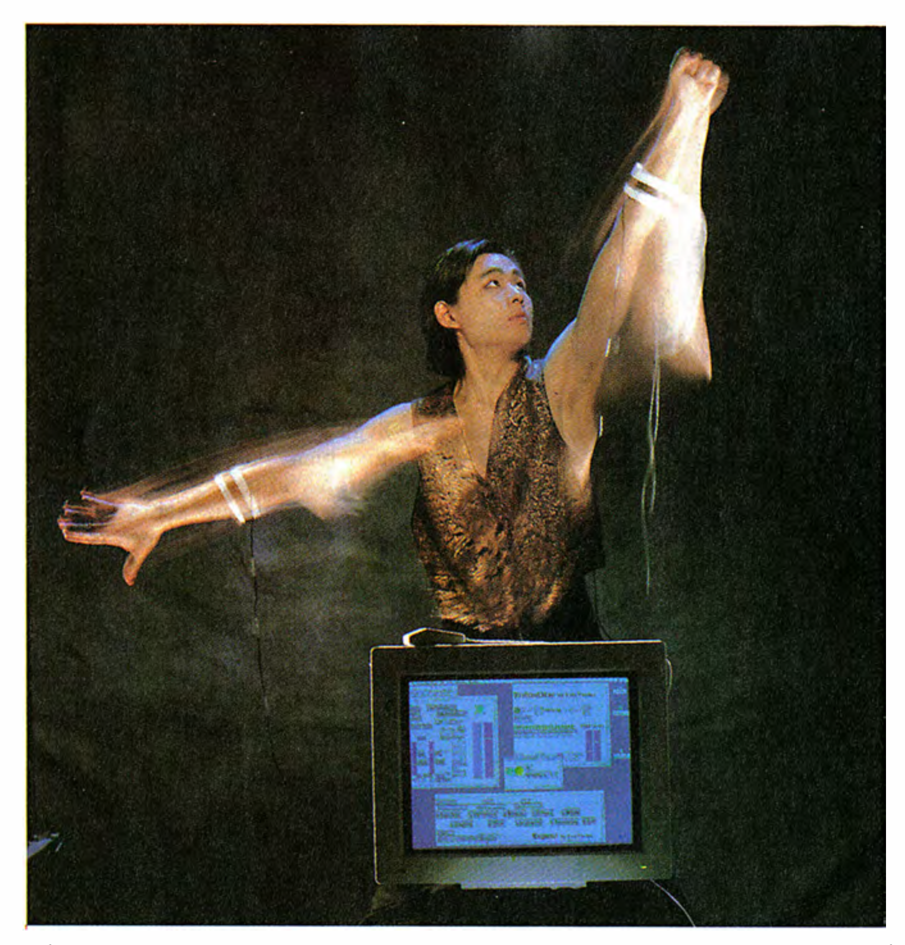
Hugh S. Lusted creó la empresa BioControl Systems en Palo Alto, California, persiguiendo un sueño de su adolescencia: construir una máquina con la que se pudieran controlar las cosas directamente con la mente. No era una idea original: abunda en las obras de ciencia-ficción. Pero Lusted la materializa por medio de unas máquinas que detectan y descodifican las señales eléctricas de los músculos, el globo ocular y el cerebro de manera que estos órganos puedan actuar sobre los ordenadores.

BioControl nació gracias al interés por la música que Lusted y Benjamin Knapp, ingeniero eléctrico de la Universidad Estatal de San José, compartían. Se conocieron en 1987, mientras tomaban parte en un proyecto de implantación coclear. Lusted era por entonces neurofisiólogo de la Facultad de Medicina de la Universidad de Stanford. "Construíamos un oído biónico; implantábamos electrodos en voluntarios sordos para estimular directamente su nervio auditivo", recuerda Lusted.

Ambos científicos se dedicaban, terminada la jornada, a preparar los circuitos y el soporte lógico necesario para controlar instrumentos musicales electrónicos con la información extraída de los electromiogramas, es decir, de los registros de las descargas eléctricas que las fibras musculares emiten al contraerse. Al cabo de unos meses ya tenían un prototipo operativo. Mediante electrodos ceñidos a sus brazos, podían tocar violines invisibles moviendo en el aire un arco imaginario: al doblar uno de los brazos el tono subía o bajaba; la tensión en el otro variaba la intensidad del sonido.

Animados por los resultados, Lusted y Knapp aplicaron sus técnicas de procesamiento a los electro-oculogramas (EOG) que producen los ojos, con la esperanza de obtener un ratón de ordenador que no hubiese que manejar con las manos. "El globo ocular es una batería, un dipolo", explica Lusted. "La retina, al ser metabólicamente activa, es negativa con respecto a la córnea, y es posible detectar el movimiento de ese dipolo dentro de un campo eléctrico". Y no sólo el movimiento, sino también la profundidad. Como los ojos convergen cuando enfocan algo, el EOG sirve para el control bidimensional y tridimensional de cursores, tal vez incluso de robots. Además, "como la señal del EOG se hace más intensa cuando aumenta la luminosidad, el nivel de luz da información acerca de qué mira el usuario", añade Lusted.

Sin embargo, las miradas han resultado ser más furtivas que los brazos. "Siempre se había creído que el EOG no podría ser, a causa de la deriva que presentan las señales, útil", dice Lusted, "pero se trataba sólo de un problema de electrodos y de electrónica" que BioControl dice haber resuelto mediante sensores de hidrogel, producidos por la firma Alternative Design Systems, de Nueva Jersey. Lusted compara la textura de los sensores reutilizables a la de las lentillas: "son ligeramente ad-



El movimiento se transforma en música. Las señales que genera la actividad muscular de Atau Tanaka mientras danza se transmiten, mediante unos sensores fijados a sus brazos, a un ordenador que las transforma en sonidos gracias a unos instrumentos musicales electrónicos

hesivos, pero no dejan residuos." Unas bandas de Velcro puestas alrededor de una extremidad o de la frente mantienen los electrodos en su sitio.

Una vez habían logrado que músculos y ojos estuviesen bajo —o más bien en el— control, Knapp y Lusted se dispusieron a llegar a lo más alto: las ondas cerebrales. Los mismos sensores en forma de cinta alrededor de la cabeza que leen el movimiento de los ojos pueden captar también un electroencefalograma; descifran, en tal caso, las ondas de potencial variable que emiten las neuronas del cerebro cuando se activan. "En principio, podrían darse las luces con pensar la palabra 'encender'; en esa dirección nos encaminamos", dice Lusted, "pero todavía estemos muy lejos del reconocimiento de patrones de ese tipo."

BioMuse ("muse" significa cavilar), sacado al mercado por BioControl en octubre como su producto de bandera, puede, de hecho, encender o apagar luces —o cualquier otra cosa— en respuesta a ondas cerebrales (no a pensamientos concretos). "Detecta la transición entre la actividad de onda alfa y la de onda beta del cerebro", aclara Lusted. "Cada vez que se cierran los ojos se pasa a un breve período de ondas alfa; esto es así en la mayoría de las personas. Practicando un poco, se pueden generar ráfagas alfa sin más que pensar en el negro".

Por medio de una pastilla de proceso digital de señal producida por Texas Instruments, BioMuse incorpora en una sola caja todos los algoritmos diseñados por BioControl. Puede así descodificar las señales transmitidas simultáneamente por ocho sensores como máximo, lo que basta para conectar al aparato las extremidades, ojos y cerebro, sobrando aún un canal para el reconocimiento de la voz. Aunque Lusted concibe un sinfín de aplicaciones de este dispositivo —cuya licencia de uso por tres años cuesta 10.000 dólores—, la mayor parte de sus actuales clientes lo utilizan para la investigación. Hay, sin embargo, excepciones. El verano pasado, Atau Tanaka, alumno posgraduado de música en Stanford, compusó y estrenó un solo de BioMuse de 2 minutos de duración que tituló "Kagami" (Espejo), porque "su música es reflejo directo de los elementos del cuerpo". Ciñéndose dos brazaletes con equipo radiotransmisor, Tanaka controlaba al danzar el timbre, tono y posición acústica de sonidos de campanas, tambores y de un instrumento de viento australiano, el "didgeridoo".

Más común es el caso de Volvo, que para fines de investigación adquirió dos unidades BioMuse. Estudian con ellas, en simuladores de automóvil, la fatiga y el estrés de los conductores. "También", dice Lusted, "quieren utilizar el controlador ocular para unas pantallas que estarían en la parte superior del parabrisas. La idea es que se mantenga la mirada alta, que no haya que bajarla para ver el salpicadero. Por seguridad."

BioControl comprende que el mercado de la investigación no basta para asegurar su supervivencia a largo plazo; atempera, por eso, su tecnología de manera que sea de utilidad en unos cuantos sectores lucrativos. Lusted explica que dispone ya de los prototipos de cuatro productos, derivados todos ellos de BioMuse, que espera poner a la venta, aunque sea a pequeña escala, en las próximas Navidades.

El más sencillo, denominado BrainMan, es un conmutador controlado por onda cerebral para videojuegos. "No es más que un juguete, y no queremos alardear de ello", dice Lusted, "pero con él hacemos llegar al mercado el mensaje de que esta tecnología es viable y puede merecer la pena económicamente". Otros productos en preparación son un controlador de videojuegos por seguimiento visual (con él se dispara encajando las mandíbulas) y un dispositivo de control muscular para instrumentos musicales. Producidos en grandes series, no costarían más de 150 dólares.

Pero esto es mucho suponer. Los gigantes de la industria de videojuegos, Sega y Nintendo, no han acogido muy bien las proposiciones de BioControl. "Sólo les interesa la mejora lineal de lo que ahora tienen", se lamenta Lusted, "y nuestros controladores no son mejores o más rápidos, sino diferentes".

Los planes de BioControl no podrán salir adelante si no se asocian con otras firmas para la fabricación y distribución, pues el capital de la empresa, fundada por siete inversores particulares, no es lo que se dice abundante. Antes de que Lusted abandonase la universidad el año pasado, ni siquiera tenía la empresa un presidente con plena dedicación. "Mi beca de investigación expiró, y por fin pude pagarme a mí mismo un salario."

Para su cuarto producto, el *Enabler* ("Capacitador"), BioControl cuenta con un aliado entusiasta, David J. Warner, del Centro Médico de la Universidad de Loma Linda, quien ha sabido utilizar las posibilidades de seguimiento muscular y visual de *BioMuse* —que *Enabler* incorpora en una placa de expansión para ordenadores personales— como medio auxiliar de diagnóstico y tratamiento de pacientes discapacitados. "Ando todo el día con verdaderas maravillas", dice, "pero aún así el *BioMuse* es una de las técnicas de interfaz más interesantes que he conocido".

Gracias a *Enabler*, pueden manejar ordenadores incluso personas que sufren parálisis muy graves. Warner lo ha probado con tres pacientes. Cristal, tetrapléjica de 18 meses de edad, ni siquiera es capaz de respirar por sí misma. Sin embargo, a los pocos minutos de ceñirse la cinta a la cabeza aprendió a desplazar una imagen que representaba un rostro sonriente por la pantalla de un ordenador sin más que mover los ojos. Tetrapléjicos de más edad emplearon, en combinación con programas, ya existentes, que completan palabras y frases, un dispositivo de seguimiento visual para escribir.

Warner conectó también un adolescente parapléjico a *BioMuse*. Tras colocar electrodos en los brazos disfuncionales del chico, "le proporcionamos un sonido de guitarra de rock", dice Warner, "y se convirtió en un Jimi Hendrix durante 10 minutos, hasta el punto de que acabó sudando. Este era un paciente del que no podíamos conseguir que hiciese nada; su motivación creció grandemente."

Pero quizá fue aún mayor el efecto que esta técnica tuvo en Dennis, un hombre de 38 años al que un ataque cardiaco dejó sin riego cerebral durante diez minutos, tras lo cual quedó en un estado vegetativo que, en opinión de los médicos, era permanente; es decir, quedó —comenta Warner— convertido "en un cuerpo unido a un tronco nervioso". Movido por la intuición, Warner solicitó y obtuvo permiso para conectar un *BioMuse* a Dennis. Localizaron en el hombro un músculo relativamente tranquilo, al que adhirieron unos electrodos; ejecutadas las pruebas básicas, "le di una orden verbal específica: que alzase el hombro. Al cabo de unos segundos", dice Warner, "pudimos comprobar claramente que existían órdenes de contracción del músculo de magnitud superior a cualquier ruido aleatorio. Fui entonces al neurólogo, y le dije que todavía había alguien en ese cuerpo, que tenía que modifi-

car su diagnóstico. Las posibilidades de rehabilitación son muy escasas, pero no es lo mismo un estado vegetativo persistente —lo que quiere decir que en ese cuerpo no mora ya nadie— que una hipoxia cerebral aguda —que todavía hay alguien dentro, pero en un estado de gran deterioro—; la diferencia es nada menos que la diferencia entre que haya aún un alma y que haya ya desaparecido del todo. Las enfermeras saben ahora que Dennis de alguna manera las percibe. Sea como sea, hemos aumentado cualquier posibilidad que pueda haber de mejorar su condición."

Un solo caso conmovedor no basta para que la Administración de Alimentos y Medicamentos estadounidense apruebe el uso médico regular de BioMuse. Warner admite que deberían reunirse varias personas cualificadas para estudiar a fondo el producto, lo cual, por otra parte, requiere unos fondos que hasta ahora han escaseado. Sin embargo, en unos días en que el orden de cosas concerniente al cuidado de la salud se encuentra sometido a reconsideración, es posible, señala, que una técnica que "podría reducir costes gracias a la automatización de la terapia" vaya siendo cada vez más respaldada. En todo caso, ocurra lo que ocurra, lo cierto es que nos promete nuevos juguetes en verdad fascinantes.

Lógica borrosa

Anticongelante para aviones

Cuando, por efecto del hielo, la nieve o la escarcha, se forma una capa de hielo en los planos de sustentación o en los alerones de un avión, sus condiciones aerodinámicas pueden empeorar hasta el punto de que podría llegar a caer. Por esta razón, todos los aeropuertos tienen a punto vehículos especiales de deshielo: poco antes de la salida del avión, un técnico retira del fuselaje el hielo y la nieve con una mezcla caliente a alta presión de agua y anticongelante. La mezcla depende de las condiciones climáticas, de la temperatura exterior que haga, de cuál sea el grado de congelación. Para evitar que antes del despegue las alas se congelen de nuevo, se rocía sobre el avión una capa protectora de anticongelante concentrado: el llamado ADF 2 (del inglés Anti-deicing fluid, fluido anticongelante), hoy muy usado, que protege durante unos 20 minutos.

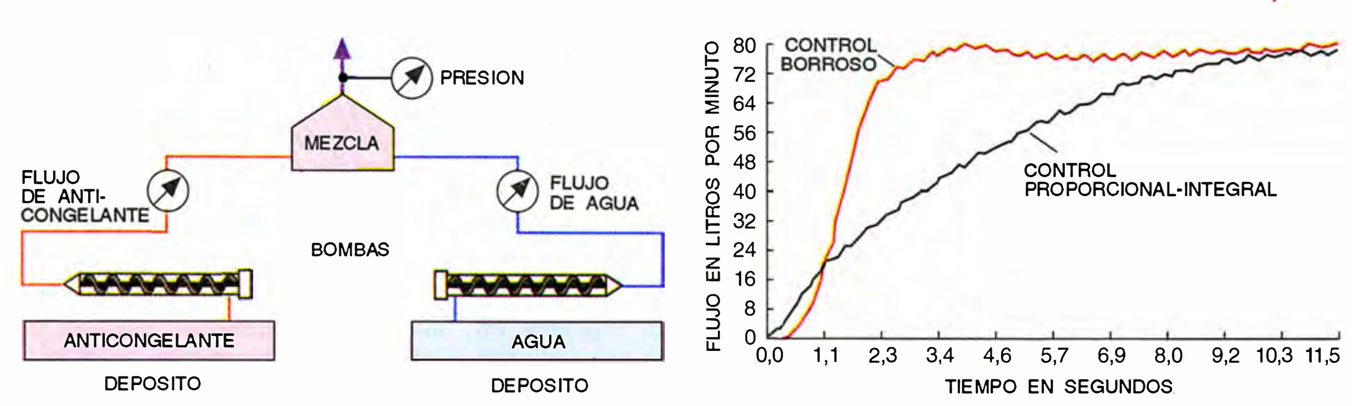
Como el tiempo acucia, hay que elaborar la mezcla rápidamente y con extrema precisión. Una dosificación deficiente, que reduzca la acción anticongelante del producto, pondrá en peligro la seguridad del avión; por otra parte, el ADF 2 es caro, y delicada su aplicación.

Las particulares condiciones del anticongelante convierten en extraordinariamente difícil el problema de la dosificación. La presión, el calor, el esfuerzo mecánico —debido a la estrechez y sinuosidad de los tubos, o a que haya válvulas abiertas sólo a medias— pueden cortar las largas cadenas moleculares del ADF y anular su eficacia. De ahí que se aspiren el agua y el ADF de sus respectivos depósitos por medio de bombas de espiral excéntrica, y entonces se mezclen.

El técnico quiere estar en condiciones de determinar la mezcla y el flujo que rocía. Debe haber un sistema regulador que actúe de tal manera sobre la acción de las bombas que la proporción de la mezcla se mantenga constante. Con ese fin, dos aparatos medidores registran el flujo momentáneo del agua o del ADF antes de que se produzca la mezcla; se mide, además, la presión en la conducción. Ahora bien, la existencia de fenómenos no lineales dificulta la regulación. El motor del vehículo acciona las bombas mediante un ciclo hidráulico en el que unas válvulas de ajuste regulan el rendimiento de las bombas —que no será, sin embargo, proporcional a la disposición de las válvulas—. La viscosidad del anticongelante, y con ella la resistencia que éste opone a la bomba, depende de la temperatura de manera no lineal. Los medidores inductivos del flujo trabajan con un gran retraso.

El proceso anticongelante de la casa Schröder recurría hasta ahora al método de regulación proporcional-integral (PI). En él, los reguladores basan su acción en la desviación del flujo respecto de su valor correcto. Una regulación fina permite que se mantenga la cantidad deseada de un litro por minuto. Si el valor registrado se desvía demasiado de ésta (más de tres litros por minuto), se pasa a una regulación menos fina que rápidamente reconduce el funcionamiento de la bomba. A esta regulación bipartita del flujo se añade además una regulación PI de la presión de inyección que, cuando ésta llega a los siete bar, se activa e impide que sobrepase los diez bar. Para que el cambio de un regulador a otro no ocurra con excesiva frecuencia, la transición se efectúa con retraso, sujeta a histéresis.

Desarrollamos esta idea de forma heurística; no era posible elaborar un modelo matemático completo del proceso sin que hubiese que realizar un esfuerzo exagerado. La regulación sufre desde un principio el lastre de que no todos los estados internos del



A la izquierda, esquema del sistema de mezcla con dos bombas. Las cantidades suministradas por ambas bombas se depositan indirectamente en el ciclo hidráulico gracias a válvulas proporcionales. Se mide la presión en la conducción. A la derecha, comparación de los flujos cuando la bomba es controlada por un regulador ordinario (negro) *y por uno borroso* (rojo) *para un valor deseado de 80 litros por minuto. El regulador borroso alcanza ese valor al cabo de 3 segundos*



La fotografía, tomada en el aeropuerto de Düsseldorf, muestra un vehículo de deshielo en acción. Contiene los depósitos de agua y de producto anticongelante (ADF), así como los sistemas de calentamiento y mezcla. Desde una cesta que pende de un brazo levadizo con una longitud de 14 metros, el empleado, por medio de un rociador gobernado informáticamente, aplica la mezcla de agua y ADF —calentada a unos 80 grados— sobre los planos de sustentación y las alas de guía del avión

sistema son medibles, lo que tiene por consecuencia que el principio de compensación de la no linealidad del sistema mediante cambios bruscos de unos reguladores lineales a otros está condenado a no cumplir su tarea de manera perfecta.

La existencia de estos problemas derivados de la no linealidad recomendó la utilización de técnicas borrosas. La experiencia con el método PI nos ofrecía una serie de reglas condicionales de la forma si-entonces; se tenía a mano, pues, la descripción verbal de una estrategia adecuada.

Desarrollamos el regulador borroso en un ordenador personal conectado en serie al controlador del sistema anticongelante que intercambiaba las magnitudes de medida y situación. Una vez hubimos preparado un regulador satisfactorio, procedimos a instalarlo en forma de tabla en el control de memoria programable del sistema.

El controlador borroso nos ha proporcionado mejores resultados que el método PI. Lo desarrollamos e instalamos en un tiempo notablemente más breve que el necesario para hacer lo propio con un regulador PI. Nos ahorramos, sobre todo, la complicada alternancia de reguladores, puesto que el borroso muestra un buen comportamiento oscilatorio y de regulación fina que se debe a su no linealidad intrínseca. Es poco sensible a los cambios de peso o de cantidad inyectada, así como al desgaste. Además, el regulador borroso tiene en cuenta, al contrario que el algoritmo PI, distintas magnitudes de medida a la vez; en este caso, de presión y de flujo.

Como las reglas de un sistema borroso sólo simulan el comportamiento del regulador en sus líneas más generales, el establecerlas adecuadamente no es por lo común demasiado difícil. Sin embargo, para la bondad del regulador borroso es de importancia decisiva la correcta elección de los elementos lógicos en que se basa —disposición y forma de las funciones de pertenencia, operadores, procedimientos de inferencia y de desemborronamiento—, puesto que la interpolación entre las reglas sueltas viene dada por ellos. En parte, esa elección es, sin duda, muy laboriosa, pero aún así resulta mucho más sencilla que la introducción de magnitudes en la regla PI. Con las soluciones borrosas que hemos ido obteniendo es posible una cómoda y rápida optimización informatizada.

La eficacia del nuevo sistema de mezcla ha sido comprobada tanto en numerosos experimentos como en la práctica. La demostración de su utilidad es, pues, al mismo tiempo la prueba de que las técnicas de control borrosas también son aplicables a problemas en los que anden en juego la seguridad y, por tanto, vidas humanas. (Heiko Knappe.)

Juegos matemáticos

Ian Stewart

La modistilla topológica

Jemima silbaba alegremente al trabajar en su vestido de verano, mientras su perro Pucci dormía feliz en un rincón. Era la primera vez que Jemima se ponía a hacer un vestido con forro. Lo único que le faltaba era coserle el forro al vestido, y hacerlo de modo que las costuras acabasen por dentro, entre el forro y el vestido, invisibles desde afuera.

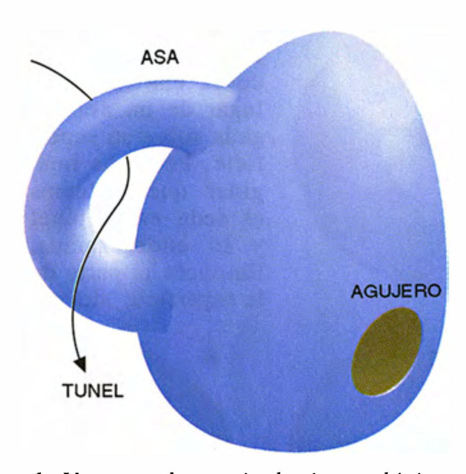
Consultó las instrucciones. "Vuelva el forro del revés. Hágalo deslizar sobre el vestido. Cósalo a máquina alrededor del cuello y de los huecos de las mangas. Déle la vuelta al vestido terminado, de manera que la tela del vestido quede hacia afuera." Con la misma ilusión que hasta entonces, cosió el contorno del escote y luego las sisas. Dejó sueltos los dobladillos, desde luego. ¡Listo! Iba a ser un vestido precioso. Jemima empezó a volverlo del revés.

¡Qué raro! ¿Se habría enganchado algo? No, porque si ella volvía a la posición inicial todo quedaba perfectamente. Pero aquella torsión final la tenía desconcertada. Media hora más tarde, Jemima arrojaba furiosa el vestido hecho una bola a un rincón del cuarto y se puso a llorar. ¡Tanto trabajo para nada! Después, habiendo dado escape a su frustración, se sentó a pensar en todo el asunto: Jemima creía firmemente que es preciso aprender de los errores.

¿Habría cortado mal alguna pieza? No, no era probable. Si es imposible volver del revés un vestido un poco mal cortado, tampoco se le puede dar la vuelta a otro de corte perfecto. El problema de volver del revés un objeto es de naturaleza topológica: la solución no cambiaría si el objeto fuese deformado continuamente. Y eso implicaba dos cosas. La primera, que las instrucciones del libro de patrones tenían que contener errores, porque los errores que ella pudo cometer, cualesquiera que hubiesen sido, tuvieron que ser muy pequeños. Segundo, la razón de que las instrucciones estuvieran mal tenía que ser *topológica*.

¿Qué recordaba ella de topología? Veamos. Para empezar estaba la noción de equivalencia topológica. Dos objetos son "el mismo", esto es, son topológicamente equivalentes, si es posible convertir uno en otro por deformación continua. Está permitido doblarlos y estirarlos y también contraerlos y retorcerlos, pero no es lícito pegarlos ni desgarrarlos ni pegar trocitos que no estuvieran pegados al principio. Esa era la idea básica. Pero, ¿qué clase de objetos estudiaban los topólogos? Había un montón de cosas sobre botellas de Klein y bandas de Möbius, que son superficies de una sola cara. Pero no era probable que eso viniera a cuento con superficies de dos caras. Había después otra serie de historias sobre superficies con agujeros. Esto otro tenía mayores visos de servir de algo.

Jemima recordó que la palabra "agujero" tenía en topología un significado bastante ambiguo. Suele decirse que una rosquilla —un toro— tiene un agujero. Pero en realidad el agujero no está en modo alguno en la rosquilla; es, más bien, un lugar donde no hay rosquilla. Mientras que si se toma la cámara de un neumático —que también es un toro— y se recorta de ella un pedacito de goma, sí se tiene un auténtico agujero.



1. Un poco de terminología topológica

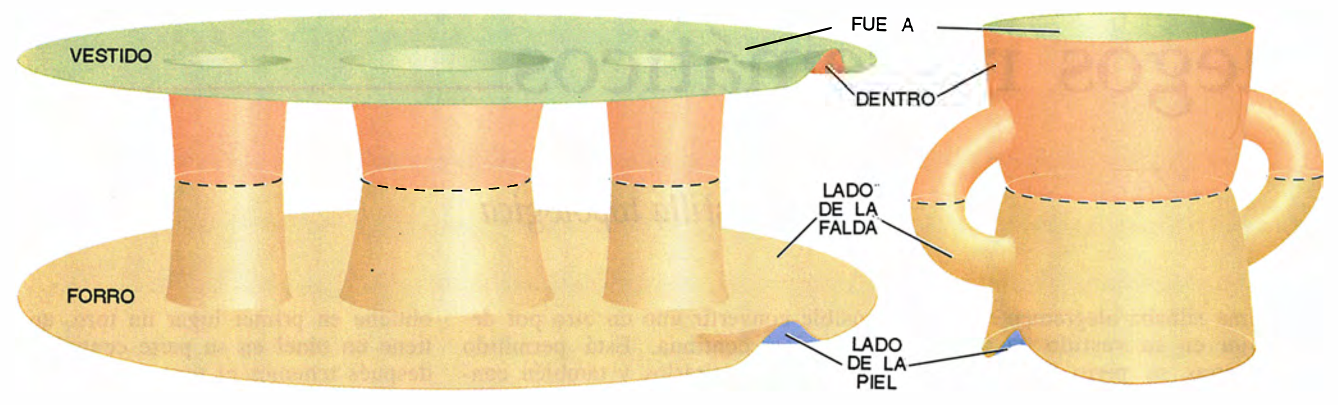
Muy bien, pensó la joven. Llamaré agujero al tipo de abertura que se forma recortando con tijeras; en cambio llamaré túneles a los huecos u ojos donde lo que pasa es que no hay superficie. Una forma de crear un túnel consiste en añadirle un asa a una superficie más sencilla [*véase la ilustración de esta página*]. Añadiendo a una esfera asas de una en una se obtiene en primer lugar un toro, que tiene un túnel en su parte central. Y después tenemos el toro de dos asas, el toro de tres asas, y así sucesivamente. Jemima sabía que estos objetos solían llamarse toro de dos agujeros, y así sucesivamente, pero no quería utilizar esta terminología, porque para ello hay que definir muy cuidadosamente lo que se quiere decir.

Ahora bien, las instrucciones especificaban que se volviera el forro del revés, de manera que su exterior quedase sobre el interior del vestido; que se cosieran el cuello y las aberturas de los brazos y que seguidamente se volvieran del revés el forro y el vestido, de manera que el interior del forro quede junto al interior del vestido... no; quiere decir que el exterior del interior del... no, el interior del interior... ¡Vaya lío! La terminología para denotar las caras iba a ser un problema tan serio como la terminología para los agujeros.

Volvamos a empezar. La tela del vestido tiene dos caras: la cara exterior, o lado visto, la que todos ven cuando nos lo ponemos, y la cara interior, que no se ve. También el forro tiene un interior y un exterior, pero estos términos pueden crear confusión. Por lo tanto, llamaremos lado-piel a la cara del forro que quedaría en contacto con la piel, y a la otra cara, la que estaría en contacto con el vestido, la llamaremos lado-falda. Bueno, como recordatorios, estos nombres no están mal.

Así, las caras del material, yendo hacia afuera, han de acabar en este orden: lado-piel, lado-falda, interior, exterior. Y es preciso coserlas de manera que las costuras que contornean las aberturas para el cuello y los brazos queden ocultas entre el lado-falda y el interior.

Topológicamente, tanto el vestido como el forro son equivalentes a discos con tres agujeros. El contorno de cada disco corresponde a la bastilla o dobladillo; los agujeros corresponden a los dos brazos y al cuello. El libro de patrones decía que se colocasen los discos de manera que el lado-piel quedase sobre el exterior, que se cosiera el contorno de las tres aberturas de manera que las puntadas quedasen sobre las superficies lado-



2. El vestido más el forro equivale topológicamente a dos discos, ambos con tres agujeros, cosidos a lo largo de sus contornos (izquierda). *Esta configuración equivale a un toro con dos asas y dos agujeros, a saber, los dobladillos del vestido y del forro* (derecha)

falda/interior [*véase la ilustración superior izquierda*] y finalmente, que se volviera del revés todo el conjunto.

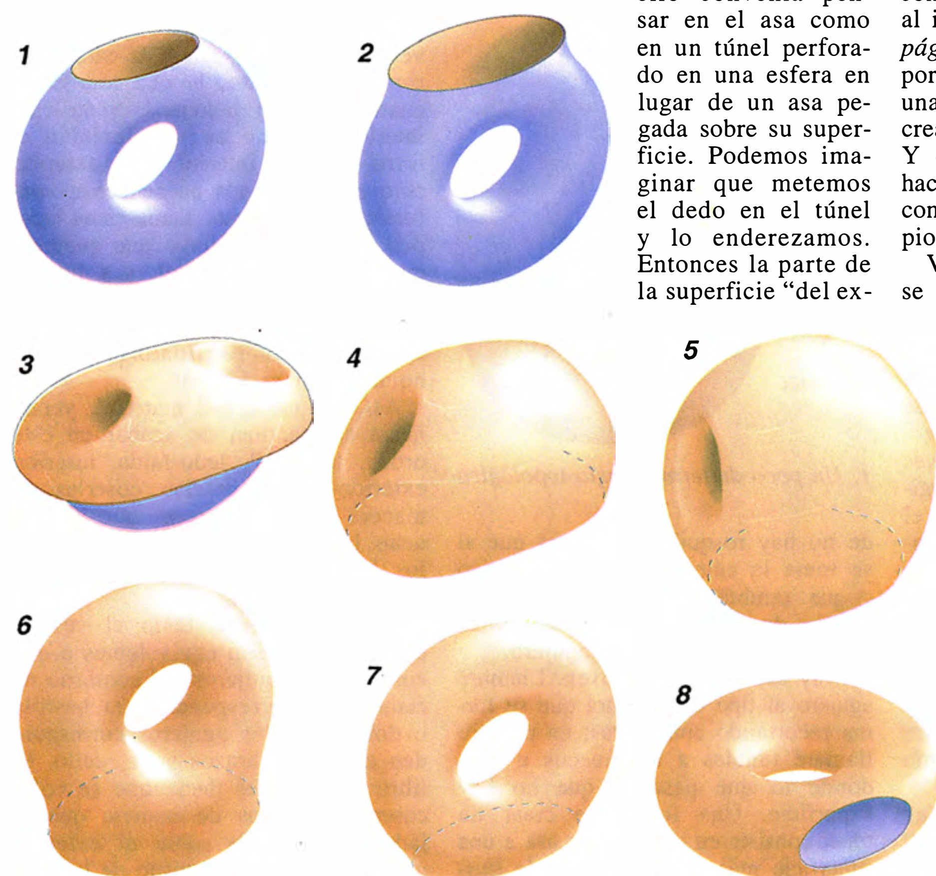
La cuestión era, pues, qué había pasado. Jemima razonó que se podía deformar topológicamente todo el montaje hasta convertirlo en un toro de dos asas con agujeros recortados en él. (Para comprender por qué, imaginemos que deslizamos ambos extremos de los tubos formados a partir de los recortes para los brazos sobre el tubo correspondiente al cuello; después doblamos la bastilla del vestido hacia arriba y la del forro hacia abajo, y por último, encogemos los dobladillos [*véase la ilustración superior*]. El problema adopta esta nueva forma: ¿es posible volver del revés un toro de dos asas si su superficie tiene dos "bocas" o agujeros?)

Resultaba bastante difícil pensar en el problema, por lo que Jemima empezó con otro un poco más sencillo. ¿Será posible volver del revés un toro ordinario si se recorta un agujero en su superficie? Y la respuesta, evidentemente, era que sí. La idea consistía en extraer todo el objeto a través del agujero; para ello convenía pensar en el asa como en un túnel perforado en una esfera en lugar de un asa pegada sobre su superficie. Podemos imaginar que metemos el dedo en el túnel y lo enderezamos. Entonces la parte de la superficie "del exterior" del túnel es un asa bastante deformada, que se puede arreglar un poco para darle mejor aspecto. Se obtiene entonces algo que se va pareciendo otra vez a un toro [*véase la ilustración al pie*]. Así que topológicamente no había dificultad.

La joven se dio cuenta de que también podía hacer otro tanto con el toro de dos asas. Fue dibujando una serie de esbozos del proceso. Primero, volver del revés todo el objeto a través de sus agujeros, de igual forma que se vuelve del revés un calentador de tobillo. Después las dos asas adosadas sobre el exterior se convierten en sendos túneles que dan al interior [*véase la ilustración de la página siguiente*]. Entonces podemos por turno introducir el dedo en cada una y tirar de ellas hacia afuera, creando un asa por el lado de afuera. Y después, lo único que queda por hacer es torcer cada asa y acabamos con el mismo montaje que al principio, pero vuelto del revés.

Vaya. Parecía que topológicamente se podía hacer. Pero cuando quiso hacerlo con un vestido de verdad, el procedimiento no funcionó.

¿Por qué no? Porque los vestidos, a diferencia de los espacios topológicos, no se pueden estirar o contraer a capricho. Sí podemos arrugarlos o retorcerlos. Cabía que la respuesta fuese distinta por ser el vestido un objeto material, pero tenía la impresión de que se trataba de algo a la vez más simple y más básico. Recogió el vestido, que estaba hecho un revoltijo en el rincón adonde lo había arrojado, y lo alisó. Podía colar el brazo entre las distintas superficies, y parecía que en efecto tenía tres asas. Pero cerca de los brazos y del cuello las cosas eran más complicadas,



3. Método para volver un toro del revés a través de un agujero

como si el forro y el vestido se confundieran uno con otro. Había tres asas, de acuerdo, pero no estaban en el lugar debido.

¡Ya! Se le había olvidado pensar en las costuras. Las costuras, al final, tenían que acabar en los lugares previstos, y separar limpiamente el vestido del forro. ¿Pero era así?

Fue situando las costuras en sus dibujos. No, no quedaban bien. Al estirar la superficie para crear las asas a partir de los túneles y retorcerlas después para situar las asas en el lugar debido, las tres costuras acababan completamente desplazadas y fuera de lugar. (E. C. Zeeman, de Oxford, ha demostrado que no se puede conseguir que acaben en los lugares debidos.) Ese era el obstáculo topológico que impedía volver el conjunto del revés. Era imposible conseguirlo si se pretendía que las costuras acabaran en los lugares donde empezaron.

Jemima tuvo otra idea. Tal vez el vestido no estuviera perdido del todo. Podía deshacer las puntadas y buscar otro medio de hacer las costuras. Tendría que actuar por su cuenta, claro. Las instrucciones del patrón no tenían ni pies ni cabeza.

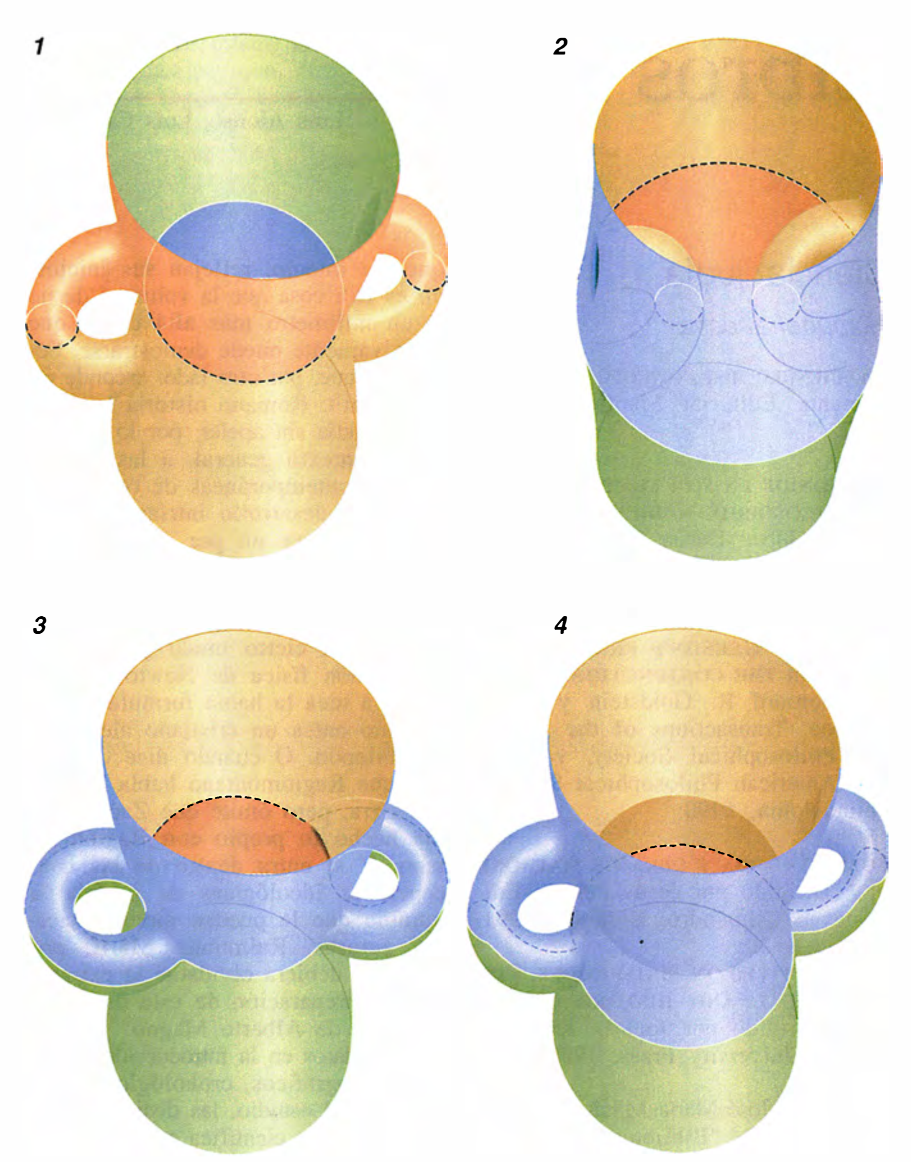
Deshizo una bocamanga y después la otra. Iba a empezar a desmontar el cuello cuando tuvo otra idea. Topológicamente, cada agujero es tan bueno como los demás. Y había que empezar por una costura cualquiera. La del cuello valía.

Experimentemos un poco, se dijo. Metió el forro y tiró de él por dentro del vestido, lado-piel hacia adentro, después lado-falda en contacto con el interior del vestido, después el exterior del vestido, bueno, por afuera.

¡Estupendo! Descubrió incluso que podía hacer pasar los brazos del forro por los brazos del vestido, justo donde tenían que acabar. La única pega era que si ahora pasaba la máquina, las puntadas de la costura quedarían a la vista, por la parte exterior.

Pues habrá que volver la manga del revés. Hizo pasar el brazo del forro al interior del vestido, volviéndolo del revés como un calcetín. Hizo después otro tanto con el brazo del vestido. Hurgó en el conjunto desde el borde del dobladillo, con una linterna eléctrica en la mano. Desde luego, parecía que se podría devolver el brazo a su posición correcta. Lo único que había que hacer era meter la máquina de coser por dentro del conjunto y después...

¡Estúpida! Mohína, se apartó de aquel montón de tela arrugada. Pasó el brazo por el cuello y sacó la manga, dejándola a la vista. Pasó la máquina por la costura y después volvió la manga del revés, dejándola en posición correcta. Ahora el vestido estaba realmente terminado. Se lo probó y dio unos pasos de baile frente al espejo. ¡Precioso!



4. Para volver el conjunto del revés, se le da la vuelta a todo y luego se tira de los túneles hacia afuera, formando asas. Se tuercen las asas hasta la posición correcta. Notemos, empero, dónde acaban las costuras

Tendría que escribir un libro sobre todo este asunto, se dijo. *Topología para sastres*. Podría contar todos los trucos clásicos de salón, como quitarse el chaleco sin quitarse la chaqueta.

Su mente iba ya en quinta velocidad. Supongamos que uno fuera un marciano y tuviera 17 brazos. ¿Cuántas bastillas serían necesarias para hacer un conjunto marciano, vestido más forro? ¿Diecisiete? No, sólo dos. Se aplica el mismo truco de pasar por la máquina sólo el cuello y después ir cosiendo cada manga, sacándola, vuelta del revés, por el escote. Era una pena que no hubiera marcianos con los que poder hacer la prueba. "¡Pucci, deja estar el vestido! ¡Tienes el hocico todo mojado!" Apartó al perrillo hacia otro lado.

¡Pucci podría servir! Tiene cuatro "brazos" y también el rabo podría sobresalir del "traje". Jemima le tomó las medidas al perro, con un mohincillo al medir la de la "cintura". Sacó las piezas de los retales sobrantes de su vestido, silbó, cosió y retorció. Sí, el método funcionaba estupendamente incluso con cuatro agujeros para "brazos". Y ahora, a ver si el traje le sentaba bien al perro.

Le *ajustaba*, en el sentido de que las medidas eran correctas. Pero perro gordo no pasa por agujero chico.

En el mundo real, existen restricciones no topológicas.

Libros

Luis Alonso, Luis Cabrera, Antonio Prevosti y A. Domínguez Ortiz

Ciencia judía

Hispanofrancesa

La ciencia hispanojudía, por David Romano. Editorial Mapfre; Madrid, 1992.

Gersonide en son temps. Science et philosophie medievales. Dirigido por Gilbert Dahan. Collection de la Révue des Etudes Juives. Editions Peeters; Louvain, 1991.

Levi ben Gerson's prognostication for the conjunction of 1345, por Bernard R. Goldstein y David Pingree. Transactions of the American Philosophical Society, vol. 80. The American Philosophical Society; Philadelphia, 1990.

Sobre la vida y obra de Maimónides. Dirigido por Jesús Peláez; Ediciones El Almendro; Córdoba, 1991.

Perspectives on Maimonides. Philosophical and historical studies. Dirigido por Joel L. Kraemer; Oxford University Press, 1991.

En 1929 José María Millás Vallicrosa creaba la "Biblioteca Hebraico-Catalana". Era el primer intento serio por sacar del olvido la historia de las aportaciones judías a la cultura hispánica. El testigo lo recogió su discípulo David Romano, sefardí y autor de *La ciencia hispanojudía*, visión de conjunto de la acción matemático-astronómica, médica y astrológica de sus correligionarios en la península durante los siglos de presencia árabe. Libro éste que, además, nos sirve de marco general donde encuadrar dos figuras preclaras de la ciencia judía: en astronomía, Leví ben Guersón y, en medicina, Mosé ben Maymón (Maimónides).

A pesar de su aspecto ligero, la obra de Romano se inscribe ya entre los clásicos de la historiografía. Más amigo su autor de los artículos de especialización que de libros generales, éste viene a ser una suerte de corolario final de una larga creación propia y numerosas lecturas de lo escrito por otros. No se engañe, pues, el lector, si muchos párrafos dan la impresión de una mano temblorosa por el bajo vuelo aparente que, de intento, reflejan sus juicios; no es otra cosa que la voluntad de no ir un milímetro más allá de lo que objetivamente puede demostrarse. Seguridad que, por otro lado, esconde un sesgo sutil: Romano historia la aportación judía sin apelar, por lo común, a un contexto general, a las aportaciones contemporáneas de otros grupos ni al desarrollo intrínseco de la ciencia. Citaré un par de ejemplos. A propósito de Hasday Cresques, afirma que "sostiene la posibilidad de que haya tal espacio vacío, con lo cual en cierto modo preludia la concepción física de Newton"; pues bien, la idea la había formulado muchísimo antes un cristiano alejandrino, Filopón. O cuando dice con razón que Regiomontano había leído a Ibn Ezra, pero omite que Zacuto había hecho lo propio con Regiomontano. Y si entra dentro de las concepciones ideológicas de partida la opinión que le puedan merecer ciertos autores, Raimundo Martí, por caso, no debiera olvidarse la extraordinaria preparación de este discípulo en París de Alberto Magno.

Deja claros en la introducción los límites geográficos, cronológicos y temáticos del estudio, las distintas áreas de producción científica atendidas y la razón de inclusión de los biografiados. Los dos capítulos siguientes (ciencia judía en al-Andalus y ciencia judía en las naciones cristianas) dibujan las grandes líneas que luego se pormenorizarán en los apartados consagrados a la alta y a la baja Edad Media, nudo central de la obra, que se prolonga en las páginas sobre los emigrados (Maimónides en Oriente y los Ibn Tibbon en el Lenguadoc). Con un esquema riguroso que se repite autor tras autor, hemos de destacar la profusión de cuadros sintéticos.

Los judíos que viven en al-Andalus hablan árabe, cobran cierto auge durante el califato y alcanzan su apogeo en el siglo XI, con los reinos de taifas. Gozan de cierta autonomía con el tiempo y asimilan la ciencia árabe. Los que se instalan en territorios cristianos se dedicarán a la transmisión y a la creación de ciencia; aumentan paulatinamente su número; se congregarán en juderías donde se rigen por sus propias leyes, y ocupan el alto funcionariado. Pero ni en el territorio musulmán ni en el cristiano se da una auténtica convivencia, sino mera coexistencia.

Mosé Sefardí (*floruit* entre 1106 y 1121), que recibió el nombre de Pero Alfonso tras su conversión, es el primer autor identificado de la alta Edad Media. Médico de Alfonso I de Aragón y de Enrique I de Inglaterra, se ocupó de la clasificación de las ciencias y destacó por sus trabajos astronómicos sobre cálculo de eclipses y confección de tablas. A comienzos del segundo tercio del siglo XII sobresale la labor compendiadora y traductora de Abraham bar Hiyya. Contemporáneo suyo sería Abraham ibn Ezra, "el más influyente de los científicos judíos que vivieron en la alta Edad Media cristiana, y lo es en su doble faceta de creador —realmente es el único en su época— y de transmisor". Usó un sistema decimal de numeración.

Desde mediados del siglo XIII hasta su expulsión de España se extiende el período más fecundo de la creación científica de los judíos hispanos. Yehudá ben Mosé ha-Kohén, Ishaq ben Sayyid, Don Abraham, Semuel ha-Leví y Don Mosé copan, por así decir, las obras alentadas por el Rey Sabio, desde las traducciones hasta las compilaciones pasando, sobre todo, por las *Tablas*, establecidas por Yehudá e Ishaq para el meridiano de Toledo y para el año *radix* de 1252.

En el Mediodía francés se refugian, a lo largo del siglo XIV, los judíos expulsos del norte. En Orange y en Aviñón se instalan comunidades florecientes bajo el amparo protector del papado que ha trasladado su sede a la segunda. En un comienzo entremezclados con la población cristiana, lo que significa capacidad de compraventa de bienes inmuebles, de movilidad e incluso de cargos públicos. Durante tiempo la única imposición, tantas veces saltada, es la de llevar la rodela distintiva. A ese período, y a su máximo exponente, Leví ben Guersón (1288-1344), estuvo dedicado un coloquio internacional celebrado en París en 1988, cuyas ponencias se recogen en *Gersonide en son temps. Science et philosophie médiévales*.

Nos centraremos en las tres colaboraciones que integran el epígrafe "ciencia", sacrificando otras de necesario estudio para hacerse una idea cabal de la labor matemática, física y

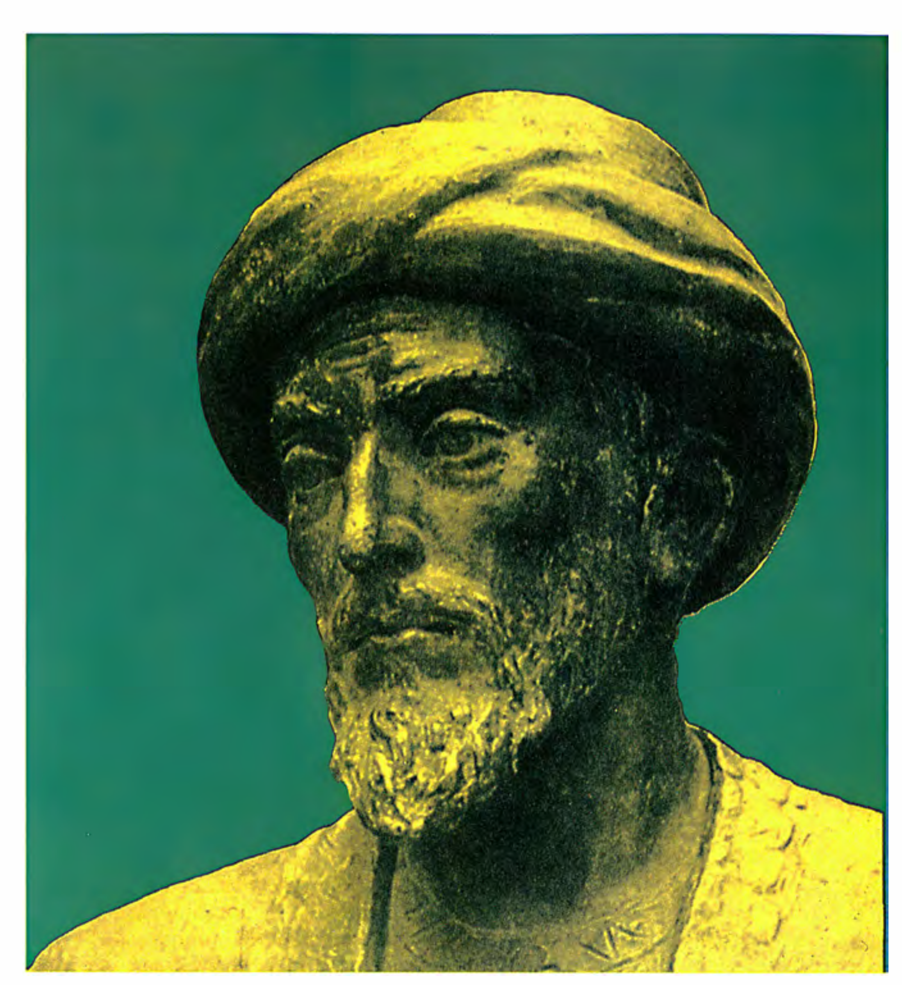
filosófica de Leon de Bagnols o "Leo Iudaeus", como, entre otros apelativos, se le conoce; nada diremos, pues, de la repesca de su biblioteca o de sus investigaciones lógicas, ni de la relación entre metafísica y física, la unidad del entendimiento, la cosmogonía o el principio de indeterminación.

Emmanuel Poulle, especialista en instrumentos medievales de observación planetaria, corta la charnela que liga la astronomía, geocéntrica y ptolemaica, de finales del XIII con la del XIV. Cuando Guersón viene al mundo, eran de uso corriente el astrolabio, la esfera armillar y el cuadrante antiguo. Pero aparecen por entonces media docena de útiles más, que dan fe de un movimiento especialmente creador. Nos describe la azafea de Azarquiel modificada, el cuadrante nuevo, el *torquetum,* el *rectangulus*, el *ecuatorium* y, por supuesto, el cayado de Jacob. Este último, ideado por Guersón, presenta dos notas inéditas: el método de graduación, que permite una mayor precisión en la lectura, y la medición de las desviaciones angulares.

En su estudio sobre la notable aportación árabe en la obra científica de Guersón, David Romano repite el patrón seguido en el libro antes comentado, donde va delimitando puntillosamente el alcance de sus palabras: si hablamos de influencia árabe en Guersón, siendo éste un experto rabino en ciencias judías (talmúdicas), diremos que los árabes no ejercieron influjo alguno; no sabiendo árabe, tampoco recibió un influjo directo. Pero, ¿de qué obras disponía? De los compendios y de las traducciones, sobre todo, de los Tibbon.

Romano se inspira bastante en los trabajos de Bernard R. Goldstein, quien participó en el coloquio con un ensayo sobre la astrología de Guersón. No debe separarlo el lector de la investigación reciente del mismo autor, con David Pingree, titulada *Levi ben Gerson's Prognostication for the Conjunction of 1345*. Este tratado de astrología pronostica que, a raíz de la conjunción de Saturno y Júpiter en marzo de 1345, se producirían hechos terribles (interpretados después como la peste negra) a los que seguiría el advenimiento de un rey pacificador.

El fenómeno de la astrología halló su caldo de cultivo en el helenismo. El propio Ptolomeo redactó el libro fundamental de la astronomía antigua, el *Almagesto*, y el catecismo de la astrología, *Tetrabiblos*. Heredada por los árabes, esa tradición pasó a los judíos, y vertida al latín, sobre todo la obra de ibn Ezra, al mundo de la cristiandad. Aunque no faltaron voces en contra, en particular contra determinados aspectos que negaban la voluntad libre, la astrología perduraría hasta que Pico della Mirandola, en las postrimerías del siglo XV, escribiera unas famosas *Disputationes*.



Busto de la estatua erigida en honor de Maimónides en el barrio de la judería de Córdoba, su ciudad natal

Guersón basa su pronóstico astrológico en datos astronómicos; así, avanza la conjunción del Sol y la Luna el 4 de marzo de 1345, antes del equinoccio vernal; el eclipse lunar del 18 de marzo de 1345, inmediatamente después del equinoccio de primavera; la conjunción de Saturno y Júpiter el 28 de marzo de 1345. Para los cálculos del Sol y la Luna se servía de sus propias tablas (que aparecen en su obra más conocida, *Las guerras del Señor*). Goldstein y Pingree apostillan en la edición crítica los cómputos reales en las notas apendiculares a un texto que suscitó un movimiento emulador en el siglo XIV.

Aunque nos limitemos a la obra médica de Maimónides (1138-1204), conviene no olvidar que, en él, el pensamiento judío de corte aristotélico alcanza uno de sus momentos más brillantes. El lector dispone de una buena edición castellana de su obra filosófica principal, la *Guía de perplejos*. Empiezan también a salir algunos opúsculos médicos, que se apoyan en textos ya aquilatados en otras latitudes.

De la copiosa bibliografía sobre este cordobés universal hemos escogido dos libros, uno en español (*Sobre la vida y obra de Maimónides*) y otro en inglés (*Perspectives on Maimonides*), aunque la mayoría de los autores del segundo pertenecen a universidades hebreas. Salvo en el carácter misceláneo, en nada se parece un volumen al otro. El español, que acoge las contribuciones a un congreso internacional celebrado en Córdoba con motivo del 850 aniversario del nacimiento de Maimónides, ni agrupa por temas los ensayos, ni tiene índices, ni ha usado ningún cedazo de control de calidad. El volumen israelí, con un elenco orientador al final, divide las aportaciones en dos apartados, las de índole predominantemente filosófica y la de orientación histórica; el nivel es, además y en general, mucho más exigente.

Maimónides ejerció la medicina forzado por las circunstancias, pese a lo cual se convirtió en físico de cámara de Saladino en El Cairo. Escribió tratados, comentarios y extractos médicos, haciendo especial hincapié en la prevención, dieta e higiene y farmacología vegetal. Los artículos españoles se limitan a resumir el estado de los estudios sobre los libros y abreviar el contenido de algunos tratados, sin entrar en mayores análisis, cuando no repiten lo escrito por comentaristas ya enmendados (Meyerhoff, por ejemplo) o deslizan algún disparate sonoro: "Todo apunta hacia la fundamentación de las prácticas de astrología judiciaria." (Maimónides se opuso, por contra, con todas sus fuerzas a esas prácticas.)

Quizá tenga que ver esa debilidad de los enfoques españoles con la propia complejidad del autor. Como ocurre en la mayoría de los medievales, no puede separarse el Maimónides médico del filósofo, e incluso del teólogo. Su tratado primerizo sobre el arte de la lógica ha de incardinarse en su interpretación simbolista de la Torá y en la resolución de las aporías médicas, que Jacob Levinger disecciona con finísimo bisturí en *Perspectives on Maimonides*. Ese ensayo y el de Tzvi Langermann sobre la astronomía de nuestro compatriota constituyen un punto de apoyo sólido para una aproximación solvente a la obra del rabino. (L. A.)

Geodinámica

Cuencas de sedimentación

SEDIMENTARY BASINS. EVOLUTION, FACIES AND SEDIMENT BUDGET, por Gerhard Einsele. Springer Verlag; Berlín, 1992.

Las cuencas sedimentarias son rasgos geológicos de elevada significación en la evolución de la Tierra. Receptoras y preservadoras de los materiales resultantes de la actuación de los procesos geodinámicos internos y externos, las cuencas sedimentarias constituyen la principal fuente de información sobre la historia de nuestro planeta durante los últimos mil millones de años.

El estudio de las cuencas sedimentarias puede abordarse desde múltiples enfoques, que convergen en un análisis integrador para obtener una visión sintética de su evolución. El análisis de cuencas tiene como objetivos establecer las características de las unidades sedimentarias que las rellenan y comprender los factores (tectónicos, sedimentarios, climáticos y biológicos) que controlaron su acumulación.

Desde una perspectiva global, la comprensión de los procesos acaecidos en cuencas donde se han acumulado volúmenes apreciables de rocas sedimentarias durante millones de años, nos permite acercarnos con seguridad a la evolución de la litosfera. Desde otro enfoque más parcial, gracias al análisis de cuencas conocemos los factores que controlaron la distribución de espesores, litologías y otras características físicas de sus sucesiones sedimentarias. En relación directa con estas características estaría la potencialidad de las cuencas sedimentarias de contener recursos explotables (carbón, petróleo, menas minerales, agua). Las prospecciones de estos recursos se han beneficiado de los avances científicos y técnicos, a menudo parejos, realizados durante los dos últimos decenios en el análisis sedimentario y estructural de cuencas.

Las cuencas sedimentarias son entidades geodinámicas; su análisis debe, pues, abordarse desde una perspectiva integral, geológica y geofísica. De manera progresiva, desde los estudios pioneros sobre el tema y hasta la actualidad, la combinación de datos procedentes de numerosas disciplinas y técnicas geológicas y geofísicas se ha revelado necesaria para alcanzar eficazmente los objetivos últimos del análisis de cuenca. Sólo la integración de estos datos, a veces difíciles de conseguir y sintetizar por su magnitud y por la diversidad de su origen, permite alcanzar la visión de conjunto que se persigue.

Con creciente rapidez hemos pasado de los enfoques descriptivos y cualitativos a los modelos cuantitativos basados en los factores que controlan la evolución de las cuencas sedimentarias. A ello han contribuido eficazmente la mayor cantidad y calidad de información disponible sobre la geología del subsuelo y la posibilidad de procesarla informáticamente. El "arte" del análisis de cuencas se ha hecho cada día más complejo y más interdependiente. Lo cual, de entrada, debería desanimar a los amantes del esquematismo y la simplificación.

Pero, por paradójico que parezca, la complicación de un tema suele traer aparejada una mayor demanda de esfuerzos de síntesis que den lugar a aproximaciones asequibles. El libro de G. Einsele responde a esa urgencia de perspectivas integradoras. También proporciona modelos simples y ejemplos idealizados para una mejor intelección de las cuencas. Einsele desarrolla, a lo largo de 14 capítulos y casi 200 páginas profusamente ilustradas, una amplia gama de aspectos que, siendo muy diversos, están estrechamente relacionados entre sí.

Después de una breve primera parte introductoria sobre los tipos de cuencas sedimentarias, el texto se adentra en una descripción sintética de los sistemas deposicionales y modelos de facies. En esta segunda parte, la diversidad y amplitud temática planteada por el autor hace que la estructura del libro se resienta de algunas incongruencias menores, especialmente en aquellos temas abordables desde diversas aproximaciones. Tal sería, a modo de ejemplo, el caso del apartado de depósitos volcanoclásticos que, incluido en el apartado de depósitos continentales, contiene aspectos referidos a acumulaciones desarrolladas en medios marinos. La existencia de un capítulo dedicado a medios deposicionales y depósitos "especiales" distorsiona además la homogeneidad del planteamiento. Dentro del capítulo sobre ritmos deposicionales y secuencias cíclicas estudia los aspectos referidos a la estratigrafía secuencial, señalando algunos de sus puntos discutibles y dando una idea adecuada de esta aproximación conceptual al análisis de las cuencas sedimentarias.

En la tercera y en la quinta partes (subsidencia, denudación, tasas de flujo y balance sedimentario. Diagénesis y flujo de fluidos), la especialización y experiencia del autor en algunos de los temas tratados han redundado en beneficio de su desarrollo. Estas partes incluyen algunos de los capítulos más densos e interesantes de la obra que merecen ser leídos como una buena introducción a aspectos del mayor interés.

En la cuarta parte del libro (evolución de cuencas) se incide en la evolución y las relaciones tectónica-sedimentación dentro del marco de la tectónica de placas. Aunque los aspectos estructurales de estos capítulos no reciban una atención exhaustiva, sí la merecen en cambio los referidos al relleno sedimentario. Se comprueba, una vez más, el escaso margen concedido a las cuencas intracratónicas de tipo "sag", que no indica sino la falta de estudios básicos.

Sedimentary Basins ofrece una buena introducción al análisis de cuenca para los estudiantes de disciplinas relacionadas con las ciencias de la Tierra (geología y geofísica). Constituye una puesta al día de la materia para aquellos profesionales cuyas líneas de investigación y trabajo no estén centradas en el análisis de cuenca o bien lo estén sólo en

algunos de sus aspectos. La presentación editorial es buena y se ajusta a los requerimientos de una obra de este estilo. Las ilustraciones son, por el esfuerzo de síntesis en ellas realizado, una de sus principales aportaciones. Las instituciones que cuenten en su biblioteca con esta obra pondrán a la disposición de sus usuarios un texto riguroso, básico y sintético, a partir del cual podrán iniciar una mayor profundización en los temas esbozados. (L. C.)

Evolución

¿Sinónimo de progreso?

THE MEANING OF EVOLUTION. THE MORPHOLOGICAL CONSTRUCTION AND IDEOLOGICAL RECONSTRUCTION OF DARWIN'S THEORY, por Robert J. Richards. The University of Chicago Press; Chicago, 1992.

La tesis nuclear del libro es que, en la concepción que tenía Darwin de la evolución, representa un papel importante la teoría de la recapitulación de la filogenia en la ontogenia y, por tanto, también la idea del progreso. Esto lo argumenta Richards en el capítulo 5, el más extenso de la obra, mediante una serie de citas de textos darwinianos. Interpretación que discrepa de la que ha venido siendo tradicional. Richards sostiene que muchos autores tienden a interpretar a Darwin en el contexto de las ideas y conocimientos actuales, en tanto que debe hacerse situándolo en su época. En el capítulo primero plantea la exigencia de estudiar, en historia de la ciencia, la evolución o filogenia de las ideas.

En el capítulo 2, aplicando esta idea general, hace un detallado análisis del cambio de significado, a lo largo del tiempo, de la palabra evolución. En el marco de la biología fue la embriología la que empezó a utilizar el término "evolución", y lo hacía de acuerdo con su genuino sentido etimológico (desenrollar, por ejemplo un pergamino); significaba, pues, el proceso de manifestación ("despliegue") sucesiva de los caracteres del individuo, que, según la teoría preformista, aunque invisibles, estaban ya presentes desde el principio del desarrollo y se iban manifestando a lo largo del mismo. Al cambiar las ideas sobre el desarrollo, evolución vino a designar el fenómeno según el cual las especies superiores pasan, en sus estadios embrionarios, por fases de las especies inferiores, hasta llegar a su forma definitiva propia. Finalmente, a través de la teoría de la recapitulación, adquirió su significado actual, en el que se refiere al proceso de transformación de las especies en el curso del tiempo. Estos cambios de significado de la palabra evolución explican el origen histórico de la relación que en las primeras teorías evolucionistas se estableció entre las ideas de recapitulación, progreso y evolución de los seres vivos.

El autor analiza las ideas embriológicas en relación con la morfología trascendental (capítulo tercero) y en conexión con el nacimiento de las primeras teorías evolutivas de cambio de las especies, que considera debieron tener influencia en Darwin (capítulo cuarto). El contenido de estos apartados conforma el marco histórico, dentro del cual se sitúan las ideas evolutivas de Darwin, en el capitulo 5.

Las heterodoxas interpretaciones de Richards han estimulado la publicación de recensiones de su libro. Hasta ahora son tres los que han llegado a mi conocimiento (Ridley, Crumly y Bowler). En lo fundamental los tres discrepan de la tesis de Richards. Rechazan que la idea de la recapitulación tenga la presencia destacada que le da éste en la obra de Darwin. Las recensiones de Crumly y Bowler tampoco aceptan la importancia de la idea de progreso y Ridley no se refiere a este punto.

No es sorprendente que, al estudiar al autor de obra tan amplia, elaborada y publicada a lo largo de muchos años, surjan interpretaciones diferentes. Menos aún si, por tratarse de una figura de la resonancia de Darwin, además de sus publicaciones se analizan también sus borradores, diarios, anotaciones, correspondencia, etc. Las ideas de Darwin "evolucionaron" con el tiempo a medida que las iba elaborando, así como por influencia de los nuevos conocimientos y por las críticas de sus colegas. Por otra parte, en su obra parece apreciarse un interés por todos los argumentos favorables a la visión evolutiva de las especies, algunos de los cuales, vistos desde nuestros conocimientos actuales, parecen incompatibles entre sí, aunque no lo eran en el siglo XIX. Tal es el caso de la interpretación de la evolución basada en la herencia de los caracteres adquiridos y en la selección natural, que se encuentran conjuntamente en Darwin, como expuse tiempo atrás. Respecto a sus ideas embriológicas cabe, seguramente, la misma interpretación, por lo menos es la impresión que se saca de la lectura del libro de Richards, junto con la de sus recensiones. No parece extraño que Darwin no viera como alternativas excluyentes entre sí la interpretación del desarrollo embrionario dada por Von Baer y por la teoría de la recapitulación.

Si a la variedad de las ideas de Darwin se añaden las implicaciones ideológicas que tienen los concep-

Representación de la ley biogenética de Ernst Haeckel

tos de evolución y de progreso, se comprende mejor que salgan interpretaciones muy dispares de sus opiniones. La cuestión de la influencia de la ideología en las ideas científicas y en las interpretaciones de los historiadores de la ciencia en general y en el caso de Darwin en particular se trata en el capítulo sexto y último ("El significado de evolución y la utilización ideológica de la historia"). Ante ese punto polémico, Richards no comulga con los motivos ideológicos que dice subyacentes en la tesis defendida por los neodarwinistas. Ideología que, por otra parte, aunque posea componentes éticos y sociales no sólo aceptables sino admirables, cree que distorsiona la historia.

Es indudable que la polémica sobre el progreso en la evolución está teñida de ideología. El análisis de Richards se dirige a las raíces de este hecho, al ligarlo a la interpretación progresiva de la escala de los seres y la introducción en la teoría de la evolución de la idea de dicha escala, convertida en la teoría de la recapitulación. La imagen que así surge se acomoda muy bien a la interpretación de la evolución como un proceso teleológico, un proceso de progreso dirigido hacia la aparición del hombre. Admitiéndola, se elude la ruptura con la ideología vigente sobre la posición del hombre en la naturaleza, en la época de Darwin. En cambio, la ciencia presenta una visión alternativa a la de esta imagen, fundamentada en dos rupturas. Primera, la innovación copernicana según la cual la Tierra no ocupa el centro del universo sino que gira alrededor del Sol. Segunda, la tesis darwiniana que sitúa al hombre en la naturaleza como otro ser vivo cualquiera. Pero Richards despoja a Darwin de esa intención, atribuida por la ideología de quienes lo han estudiado; no encaja en el seno de los conocimientos de su época, sino en el cuadro mental de los neodarwinistas actuales.

En realidad, basar la idea de progreso en la evolución, en la noción de la escala de los seres vivos con el hombre en la cima, como resultado de un proceso teleológico, es dar a esta idea un significado muy restringido. Mas, precisamente por las connotaciones ideológicas que tiene la cuestión de si la evolución biológica es un proceso progresivo o no, surge la necesidad de plantearla en términos más amplios. Por ello, sigue siendo objeto de debate entre los estudiosos que tratan de situar la evolución dentro del pensamiento en general. Una prueba de ello es el libro *Evolutionary Progress* (Nitecki, 1989), en el que se reúnen artículos de autores procedentes de los campos de la filosofía y la historia de la ciencia, que comenté en estas mismas páginas.

Richards contribuyó a dicho volumen con un artículo en el que se expresan algunas de las ideas desarrolladas aquí. Concluía en ese ensayo que la visión de Darwin, de progreso en la evolución, "no difiere tremendamente de la de Spencer", considerado frecuentemente como la antítesis de Darwin, porque percibe progreso en la evolución. Ruse, en su aportación al volumen mencionado, aprecia que toda la visión darwiniana de la evolución está impregnada de la idea de progreso, obviamente sin fundamentarla en la recapitulación. La detecta no sólo en los forjadores del neodarwinismo, sino también en autores más recientes, que explícitamente se muestran contrarios a esta idea, tales como S. J. Gould. Por otra parte, incluso en Darwin, autores como Ospovat detectan la idea de progreso desligada de la de recapitulación. (A. P.)

Miscelánea

Homenaje

ESTUDIOS HISTÓRICOS. —Homenaje a los profesores José María Jover Zamora y Vicente Palacio Atard—. Madrid; Universidad Complutense, 1990, dos volúmenes.

La costumbre, ya hecha ley, afortunadamente, de homenajear a los profesores universitarios jubilados con una recopilación de trabajos de amigos y admiradores enriquece notablemente nuestro panorama cultural, a la vez que constituye una especie de desagravio para unos servidores del Estado a los que la Administración, una vez cumplido el plazo reglamentario, retira de la circulación con la indiferencia del que retira un obstáculo de la vía pública. La única distinción que les otorga es dejarlos unos meses sin percibir haberes hasta que se liquidan los trámites del expediente de jubilación.

La obra que nos concierne ahora tiene la singularidad de estar dedicada no a uno sino a dos profesores, con lo que se da remate a un notable paralelismo de dos carreras científicas. Ambos nacieron el mismo año (1920) en dos extremos de la geografía peninsular: Palacio Atard en

Bilbao, Jover Zamora en Cartagena. Dirigen sus preferencias a la historia moderna y contemporánea de España y conquistan cátedras de esta especialidad, sirviéndola en universidades de provincias, y terminan su carrera docente en la Universidad Complutense. Carrera brillante, cortada, como la de tantos otros eximios enseñantes, por una absurda disposición legal que adelanta la jubilación a los 65 años, una edad en la que la mayoría llegan en la plenitud de su magisterio y de la capacidad creadora. Por fortuna, la mayoría siguen en activo, y tanto Jover como Palacio incrementan el elenco de sus publicaciones, orientadas principal aunque no exclusivamente, hacia la contemporaneidad española.

Los dos volúmenes que reseñamos son el complemento de un número especial de los "Cuadernos de Historia Contemporánea" aparecido hace pocos años, en los que se traza una semblanza y se incluye una selección de textos, mientras que en los dos volúmenes de *Estudios* se recopilan, tras una breve y acertada "Presentación" de Antonio López García, 66 colaboraciones. La mayoría proceden de discípulos de los homenajeados y constituyen una prueba patente de la fecundidad de su magisterio. También es lógico que casi todos estos trabajos versen acerca de temas relativos a los dos últimos siglos de la vida española, lo que confiere al conjunto una unidad de la que carecen muchas de estas obras colectivas, que resultan demasiado heterogéneas.

Los temas extranjeros son poco tratados, y casi siempre en relación con España. Sin duda, éste es un fallo de nuestro panorama investigador: hay muchos historiadores franceses, alemanes, italianos, anglosajones, que enriquecen nuestra historia con sus aportaciones, pero hay pocos investigadores españoles de la historia de Francia, de Alemania o del Reino Unido, y esto confiere a nuestra producción global un cierto aire limitado y provinciano que convendría superar.

Los coordinadores de la obra han sistematizado las colaboraciones en siete grandes bloques temáticos; el tomo primero abarca los concernientes a Historia Política, Relaciones Internacionales e Historia de América; el segundo, los otros cuatro: Historia Social, Historia Económica, Iglesia y Sociedad e Historia de la Cultura. La homogeneidad del conjunto se completa así con un equilibrio entre las dos tendencias fundamentales que se disputan el ámbito del quehacer histórico: la historia política e institucional, que a pesar de los ataques de que ha sido objeto sigue gozando de muy buena salud y atrae a numerosos investigadores, y la historia socioeconómica, completada con todo lo que se encierra bajo el vago y discutido rótulo de *Mentalidades*. En mi opinión, ambas corrientes pueden y deben coexistir en buena paz y armonía como lo hacen en estos *Estudios*.

Repasando el índice se pueden hacer algunas constataciones de interés: la masa de las colaboraciones se refiere a nuestro siglo XIX y comienzos del XX. Sorprende la poca presencia de nuestra guerra civil: sólo tres trabajos, ninguno de los cuales se refiere a operaciones militares. ¿Es a lo mejor un indicio de que está cediendo la obsesión por aquellos luctuosos años?

Como introducción a los tiempos contemporáneos, el siglo XVIII tiene una discreta representación. Otro ámbito muy cultivado hoy, el de la mujer, sólo ha merecido la atención de uno de los autores. En conjunto, la época de la Restauración me parece la mejor representada en el panorama que ofrecen estos dos volúmenes, densos y variados dentro de la ya apuntada homogeneidad. No voy a citar nombres porque quizá podría parecer una descalificación de los no mencionados, y ello sería injusto, pues si bien en el conjunto hay rúbricas destacadas no sería apropiado hablar de cimas y depresiones.

El panorama que al curioso lector ofrecen estos dos volúmenes más bien es comparable al de una campiña de variados frutos: quien se interese por el Setecientos napolitano hallará coloristas imágenes en la correspondencia enviada a Madrid por el príncipe de Santo Buono. A los estudiosos del tema de la esclavitud interesará un buen artículo sobre *Los abolicionistas españoles*; aquellos a quienes seducen los relatos biográficos encontrarán pocas pero muy útiles aportaciones. Los orígenes del catalanismo reciben nueva luz gracias a un documentado trabajo sobre *Los silvelistas catalanes*. Sorprendente resultará para muchos la afirmación, sólidamente documentada, de que el desequilibrio de fuerzas no era tan grande en la guerra hispanoamericana; o, al menos, así lo pensaban relevantes políticos españoles y extranjeros... Y si para especialistas se ofrece abundante cosecha, el simple aficionado a lecturas históricas podrá saciar su curiosidad con variedad grande de temas y argumentos expuestos con amenidad y en lenguaje accesible a todos. (A. D. O.)

Ensayo

W. Brian Arthur

¿Por qué las cosas se complican cada vez más?

Hace cincuenta años nuestras técnicas, nuestras organizaciones, nuestras vidas eran menos complicadas que hoy. Las cosas eran más simples. Se puede apreciar la llaneza; la complejidad, sin embargo, fascina. Ultimamente me vengo preguntando por qué lo simple se torna complejo: ¿hay algún principio en virtud del cual al pasar el tiempo hayan de complicarse las cosas? ¿Es útil la complicación?

El primer turborreactor, inventado por Frank Whittle a comienzos de los años treinta, era hermosamente simple: pero al transcurrir los años los aviones que le siguieron se fueron complicando cada vez más. ¿Por qué? Los intereses comerciales y militares presionan sin cesar para que se superen los límites impuestos por las velocidades y las temperaturas extremas, para que se dominen situaciones excepcionales. Estos progresos se consiguen, a veces, empleando materiales mejores, pero más a menudo se deben a sistemas complementarios añadidos a la máquina.

Estos añadidos requieren, a su vez, otros subsistemas para su registro y control, para incrementar su eficacia y superar sus limitaciones. Y esos otros subsistemas requieren, también a su vez, más sub-subsistemas para aumentar su eficacia... Todo ello, sin duda, comporta mayor rendimiento —el turborreactor actual es entre 30 y 50 veces más potente que el de Whittle—. Pero así se acaba cubriendo el sencillo sistema original con una costra de subsistemas y más subsistemas superpuestos que forma una intrincada red de módulos y partes: los modernos motores a reacción constan de más de 22.000 elementos.

Nada tiene de malo tal aumento de la complejidad. Incluso es admirable. Por fuera, los turborreactores son esbeltos, de líneas elegantes; por dentro, muy complejos. En la naturaleza, los organismos superiores son del mismo estilo: un guepardo es, por fuera, ágil y fuerte; por dentro, más complicado aún que cualquier motor a reacción. El guepardo tiene también sistemas autorreguladores, sistemas sensores, funciones de control, funciones de mantenimiento... todo ello reunido en un complejo conjunto de órganos, células y orgánulos que modulan y dirigen no unas maquinarias artificiales, no aparatos electrónicos, sino multitud de interconexas redes de vías químicas y neurológicas. La incesante presión competitiva hace que la evolución "descubra" ocasionalmente nuevas funciones que quitan barreras a la eficacia. Hay algo admirable en esto, en cómo, a lo largo de los eones, se fue formando el guepardo a partir de sus sencillos ascendientes multicelulares.

Sin embargo, a veces, los resultados del aumento de complejidad no son tan elegantes ni tan eficientes. Por ejemplo, hará unos 60 años la asignación y administración de becas para investigadores ocupaban a escaso personal; en cambio, hoy en día esas funciones requieren un enorme tinglado de departamentos, despachos jurídicos, oficinas de asesores y tutores de proyectos, decanatos de investigación, comisiones para la evaluación de los candidatos y la concesión de las becas, otras comisiones más para el control de su aprovechamiento, oficinas expendedoras de los correspondientes certificados, recibos y títulos, etc. Semejante aumento es, en parte, necesario, porque el mundo mismo de las becas de investigación se ha vuelto mucho más complicado (y la complejidad genera ulterior complejidad). Pero ocurre a menudo que las nuevas instancias burocráticas se perpetúan porque los intereses corporativos que crean sobrepujan a toda fuerza competidora exterior que pudiera abolirlas. En 1896, mi propia Universidad, Stanford, tenía sólo 12 administrativos. Todavía tiene menos que la mayoría de las universidades, pero hoy en día su personal administrativo es ya más numeroso que aquél con el que Inglaterra gobernó toda la India allá por 1830.

Y esto mismo sucede también con nuestras vidas. A medida que aumentan nuestras posibilidades económicas vamos contando con más medios para sacar partido de nuestro limitado tiempo: nos hacemos con una profesión, con un coche, una casa, ordenadores, programas para los ordenadores, animales, una piscina, un segundo coche... Muy bien. Sólo que todas estas cosas traen consigo su necesidad de mantenimiento, reparaciones, citas, obligaciones... un sinfín de actividades complementarias si queremos seguir disfrutando de ellas. Aquí también el resultado es, a fin de cuentas, un aumento de complejidad discutiblemente eficiente.

De modo que, en respuesta a la pregunta del comienzo, creo que puede enunciarse una ley general: la complejidad tiende a ir en aumento a medida que a un sistema se le añaden funciones y modificaciones para rebasar límites, para dominar circunstancias excepcionales o para adaptarse a un mundo que ya sea en sí más complejo. Esta ley es aplicable, si bien se piensa, no sólo a las tecnologías y a los organismos biológicos, sino también a los sistemas legales, a los de impuestos, a las teorías científicas y hasta a las sucesivas ediciones de un programa de ordenador.

Pero, cosa interesante, por más sobrecargado de complicaciones que llegue a estar un sistema, todavía hay esperanza : más pronto o más tarde, se da con una nueva concepción simplificadora que cercena de raíz la idea que sustentaba al viejo sistema y viene a reemplazarla. El sistema astronómico de Copérnico, deslumbrantemente simple, basado en el heliocentrismo, sustituyó al de Ptolomeo, que era desesperantemente complicado. No deja de ser irónico que el turborreactor de Whittle sustituyese al complicadísimo motor aeronáutico de pistón de los años 1930... antes de volverse también él mismo complicado. Y así la creciente complejidad va seguida muchas veces de una renovada sencillez, en lenta danza hacia atrás y hacia delante, proceso en el que la complicación suele ir conquistando, a lo largo del tiempo, nuevas cotas.

El escritor Peter Matthiessen dijo en una ocasión que "el secreto del bienestar consiste en la sencillez". Cierto. Pero el secreto de la evolución consiste en el continuo afloramiento de la complejidad. La sencillez trae ahorro, acaba drásticamente con lo que sobra. En cambio, la complejidad posibilita ante todo que haya organismos como los nuestros. La complejidad es, sin duda, una maravilla cuando evoluciona naturalmente y origina rendimientos poderosos. Pero si la buscamos por sí misma, como un fin, o si la dejamos ir sin control, únicamente obstaculiza y daña. Entonces es cuando necesitamos descubrir modos nuevos, concepciones audaces, que den lozana sencillez a nuestras organizaciones, a nuestra técnica, a nuestro gobierno, a nuestras vidas.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



LA ELIMINACION DE CABEZAS NUCLEARES, por Frank von Hippel, Marvin Miller, Harold Feiveson, Anatoli Diakov y Frans Berkhout

Durante los próximos diez años es posible que se desactiven más de 50.000 cabezas nucleares. Lo que con ellas se haga requerirá innovaciones tanto técnicas como políticas.

¿MAS VELOZ QUE LA LUZ?, por Raymond Y. Chiao, Paul G. Kwiat y Aephraim M. Steinberg

Algunos experimentos de óptica cuántica indican que dos sucesos alejados se pueden influir mutuamente más deprisa que lo que pueda tardar cualquier señal en ir de uno a otro.

ANERGIA DE LAS CELULAS T, por Ronald H. Schwartz

Cuando las células del sistema inmunitario advierten, en ausencia de las coseñales adecuadas, la presencia de antígenos, en vez de atacar, se desactivan. Las terapias del futuro podrían sacar fruto de esta reacción.

UN UNIVERSO DE COLOR, por David F. Malin

La fotografía en color sigue siendo una importante herramienta astronómica, y revela detalles de los objetos celestes aún no captados por los detectores electrónicos modernos.

DOMINAR EL CAOS, por William L. Ditto y Louis M. Pecora

Ya es posible controlar ciertos sistemas de comportamiento caótico. Los ingenieros pueden valerse del caos para estabilizar láseres, circuitos electrónicos e, incluso, corazones de animales.

DIETA Y EVOLUCION DE LOS PRIMATES, por Katharine Milton

Muchas características de los primates modernos, y también de nuestra propia especie, derivan de la costumbre que un antecesor remoto tenía de alimentarse principalmente con lo que la bóveda de la selva tropical le ofrecía.

EL GRAN ESCANDALO DEL RADIO, por Roger M. Macklis

William J. A. Bailey fue acumulando riquezas gracias a su patente de una medicina que contenía radio hasta que el fármaco provocó la muerte de un personaje destacado. El escándalo contribuyó a que se definiesen los criterios actuales de regulación de los radioisótopos.

ORIGEN DE LAS EVAPORITAS, por Carlos Ayora, Carles de las Cuevas, Javier García Veigas, Lourdes Miralles, Juan José Pueyo y Pilar Teixidor.

Aproximadamente el 3 por ciento de las rocas sedimentarias presentes en la corteza terrestre están constituidas por minerales formados a partir de salmueras sometidas a evaporación.

